

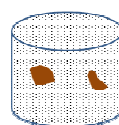
Appui pédologique au projet CARPAGG
Sols de prairies de Guyane : diagnostic et profils de référence.
Calcul du stock de carbone d'un sol.



Photo : V. Blanfort



Photo : B. Dallaporta



SOC_{stock} = ...



Vincent Freycon
24 août 2016

Contexte et objectif

Le projet CARbone des Pâturages de Guyane et Gaz à effet de serre (CARPAGG ; responsable : Vincent Blanfort, Cirad, Umr Selmet) s'est déroulé de 2009 à 2013 avec un financement du FEDER 2007-2013 de Guyane.

Dans le cadre de ce projet, nous avons apporté plusieurs appuis de terrain en pédologie, notamment lors de la mise en place du dispositif en mars 2010 et plus récemment en mai 2015. Au cours de ce projet, nous avons aussi eu des discussions scientifiques, notamment avec V. Blanfort, S. Fontaine et C. Stahl sur les déterminants de stockage de carbone du sol, la dynamique du carbone du sol après déforestation et installation de pâturages, le calcul d'un stock de carbone, etc.

L'objectif de ce document est de restituer une partie des appuis et synthèses que j'ai menés au sein du projet CARPAGG, plus précisément un diagnostic de sols de prairies en mai 2015 (**Chapitre 1**), une mise au point finalisée en novembre 2015 pour calculer un stock de carbone du sol (**Chap. 2**), le rattachement au WRB de deux profils de référence décrits en mars 2010 (**Chap. 3**) et un exposé sur les déterminants de la teneur en carbone présenté en mars 2010 (**Chap. 4**).

Chapitre 1

Diagnostic de sols de prairies (Terrain, mai 2015)

1. Contexte

Deborah Glaizal (Etudiante de l'Isara en 3^{ème} année) a effectué en 2015 son stage de fin d'études sous la responsabilité de Vincent Blanfort (Cirad Montpellier, Umr Selmec) et de Raphaël Martin (INRA Clermont-Ferrand, Urep). Le sujet de son stage était le suivant « Mise au point de bilans carbone en systèmes herbagers amazoniens ». D. Glaizal devait adapter le modèle PaSim aux pâturages de Guyane. Ce modèle simule les flux de carbone, d'azote, d'eau et d'énergie à l'interface entre le sol, la plante, l'animal et l'atmosphère de pâturages à l'échelle de la parcelle.

Afin de pouvoir mieux estimer les variables d'entrées sol du modèle PaSim (ex. Profondeur de la dernière couche de sol, texture, ...), nous avons prospecté les sols de différentes prairies du littoral guyanais.

Cette prospection a été réalisée sur trois jours (Annexe 1) en compagnie de Deborah Glaizal (stagiaire Isara, J1, J2), Nerea Ngfok (Ikare, J1), Bastien Dallaporta (stagiaire Enita Bordeaux, J1, J3) et Patrick Erre (Chambre d'Agriculture, St Laurent du Maroni, J3). Elle a été permise grâce à un financement du projet Carpagg d'un montant de 1000 euros.

2. Matériel et Méthode

Notre prospection a eu lieu dans les parcelles de 9 exploitations (Tab. 1, Fig. 1). A l'exception d'une parcelle consacrée à un essai (sorgho, plante de couverture *Mucunia sp.* ...), toutes les parcelles étaient des prairies destinées soit au pâturage par des bovins, soit à la fauche. Ces prairies étaient anciennement des forêts ou des savanes. Ces prairies sont constituées majoritairement du kikuyu (*Brachiaria humidicola*), une graminée que l'on trouve souvent associée au *Desmodium heterocarpon*, une légumineuse. Certaines prairies ont des zones envahies par des adventices telles la sensitive (*Mimosa pudica*), la tête nègre (*Spermacoce globosa*) ou des Cypéracées.

D'après la carte géologique du nord de la Guyane à 1 :500 000 (Choubert) et les cartes au 1 :100 000 de Kourou et d'Iracoubo (Barruol 1959, Mazéas 1961), ces 9 exploitations sont toutes situées sur des formations sédimentaires du quaternaire, en majorité la série de Coswine (Q₂), mais aussi la série de Démerara (Q₃) ou la Série Détritique de Base (SDB) (Fig. 1 à Fig. 5). Notons que dans ces formations sédimentaires du quaternaire se trouvent des anciens cordons littoraux qui sont grossièrement parallèle à la côte actuelle. Notons enfin que l'exploitation de Bergère se trouve à proximité du socle précambrien, constitué à cet endroit de schistes Bonidoro.

Dans ces 9 exploitations, nous avons effectué 16 sondages tarière, jusqu'à au moins 1 m de profondeur. En général, au sein d'une exploitation, la topographie des parcelles à étudier étant assez homogène, nous nous sommes souvent contentés d'un seul sondage par exploitation. Si la topographie était plus hétérogène, plusieurs sondages ont été réalisés ou bien un seul sondage en privilégiant le point haut du modelé, en-dehors des zones engorgées. Parfois, nous avons aussi effectué deux sondages pour estimer si des zones particulières (peu « fertile », envahie par une adventice, ...) s'expliquaient par le sol. Pour chaque gamme de profondeur, 0-10 cm, 10-20 cm, etc. nous avons décrit plus particulièrement la couleur et la texture du sol et gardé un échantillon dans un pédocomparateur.

Nous avons croisé les 16 échantillons avec les images SRTM du nord de la Guyane afin d'avoir une estimation de leur altitude. Nous avons à notre disposition des images SRTM à 90 m de résolution ou bien à 30 m de résolution (Annexe 6). Globalement, nous avons trouvé que les images SRTM à 90 m de résolution sont plus proches de la réalité du terrain même s'il reste quelques incohérences (Tab. 1).

Nous avons aussi recueilli 14 échantillons de sol entre 0 et 30 cm de profondeur en vue d'analyses de sol au laboratoire (granulométrie, pH, C, N...). Pour un sondage (s13, Delor), nous avons prélevé avec une tarière racinaire deux échantillons de sol entre 0 et 15 cm puis entre 15 et 30 cm, en vue d'avoir une mesure de la densité apparente. A la suite de cette mission, d'autres prélèvements à la tarière racinaire ont été réalisés par B. Dallaporta. Nous restituerons dans ce rapport uniquement les analyses des 14 échantillons de sols entre 0 et 30 cm de profondeur.

Précisons enfin que nous avons effectué le terrain en pleine saison des pluies, notamment le 1^{er} jour et le 3^{ème} jour qui ont été caractérisés par des matinées fort pluvieuses.

3. Résultats

On se reportera à l'Annexe 2 pour avoir le détail de la texture et de la couleur de chacun des 16 sondages tarière en fonction de la profondeur. La Fig. 6 donne une vision d'ensemble de ces 16 sondages classés suivant un gradient d'hydromorphie. Les analyses des 14 échantillons de sol sont restituées dans le Tab. 2 et les Fig. 8 et 9.

3.1. Des sols marqués par l'hydromorphie.

A l'exception de deux sondages (s4, Buffard ; s14, Dolor), tous les sondages ont des taches dès pratiquement la surface et jusqu'en profondeur. Dans certains sondages, le contraste de ces taches par rapport à la couleur de la matrice s'accroît avec la profondeur. Parfois, vers 80 cm, on n'arrive plus à distinguer tache et matrice. On observe alors des plages de couleurs bien distinctes. Ces taches révèlent des conditions hydromorphes à la fois en surface et en profondeur.

En général, le profil d'humidité du sol en fonction de la profondeur évoluait d'humide (horizon de surface) à très humide/noyé puis frais vers 1 m de profondeur. L'horizon noyé se situait juste au-dessus d'un horizon argileux compact ou limoneux. Comme nous avons observé cet horizon noyé à une profondeur différente suivant les sondages, nous avons pu classer les sondages suivant la profondeur d'apparition de l'horizon noyé (> 1m → surface du sol) : s4, s13, s14, s9, s10, s12, s11, s3, s5, s6, s7, s8, s1, s2, s15, s16.

Dans quasiment toutes les parcelles, nous avons observé de l'eau qui stagnait à la surface du sol, durant un épisode pluvieux et au moins jusqu'à 24 h après. Cette eau stagnante était accentuée sur les zones de passage de 4x4 (le long des clôtures) et les zones surpâturées (sol nu). Dans une parcelle pentue (ex. Delor), nous avons observé des ravines qui collectaient les eaux de ruissellement suite à un épisode pluvieux.

3.2. Des sols de surface sableux ou sablo-argileux

A l'exception d'un sondage (s11, Joffre), nous avons constaté sur le terrain que l'horizon de surface (0-10 cm) était sableux ou sablo-argileux, les horizons sous-jacents étant relativement plus argileux. Cette observation a été confirmée par les analyses de sol puisque la teneur en sables entre 0 et 30 cm de profondeur est déjà comprise entre 48 et 96% (Tab. 2), ce qui suggère qu'elle est encore plus élevée pour l'horizon de surface.

3.3. Des sols particuliers

Les horizons de surface de trois sondages sont particulièrement sombres (Value = 2 ou 3) : plus particulièrement le sondage s11 (Joffre), noir (10YR2/1) et à un degré moindre les sondages s9 et s10 (Bergère), gris très sombre (10YR3/1) ou brun-gris très sombre (10YR3/2). A priori, ces horizons ont de fortes teneurs en matière organique, ce qui est confirmé par les analyses de sol pour le sondage s11 (C=2,4%) mais pas pour les sondages s9 et s10 (C=1,1 et 1,4%). Notons que des sols avec une forte teneur en carbone organique n'ont pas obligatoirement une couleur noire. C'est le cas du sondage s13 (C=3%).

Nous avons observé des racines nombreuses généralement jusqu'à 20 cm de profondeur. Dans la plupart des sondages, elles sont encore présentes mais rares vers 1 m de profondeur. Dans le sondage s13 (M. Delor ; parcelle 2), nous avons trouvé de grosses racines (diamètre= 10 mm) à 1 m de profondeur. Ces racines sont des témoins des arbres qui ont été coupés mais non dessouchés il y a **n** années (**n à préciser par Patrick Erre**). Dans cette parcelle 2, Les souches brûlées sont encore sur place et envahies par des fourmis.

Nous avons observé des vers de terre dans seulement l'horizon de surface (10 premiers centimètres) de deux sondages (s10, Bergère ; s11, Joffre).

Nous avons été surpris par la température du sol, élevée par rapport à celle des sols forestiers, même en profondeur, notamment dans les sondages s1 et s2 (Villarsin) où le sol était peu couvert.

3.4. Variabilité des sols au sein d'une même parcelle/exploitation

Dans la parcelle de M. Villarsin, il existe une zone peu « fertile » (rien ne pousse) qui est proche d'un pripri et d'une forêt. Elle correspond aussi à de fréquents passages d'engins agricoles (demi-tour). Les causes suggérées étaient : (i) le sol (proximité du pripri → zone affectée par battement de nappe) ; (ii) l'ombre portée par les arbres de la forêt voisine une bonne partie de la journée ; (iii) la compaction du sol.

Nous avons alors réalisé deux sondages dans la parcelle de M. Villarsin, le sondage s1 dans une partie où les cultures poussent normalement, et le sondage s2 dans la zone peu « fertile ».

Comme les caractéristiques des sondages s1 et s2 sont très similaires (Fig. 7a), nous suggérons que la cause de cette zone peu « fertile » n'est pas le sol mais certainement l'ombre des arbres de la forêt voisine.

Dans l'exploitation de Buffard, nous avons observé des différences entre les sondages s4 (sans tache, davantage sableux, homogène) et s3 (taches, davantage argileux, hétérogène) (Fig. 7b). Ces différences sont certainement à relier avec la légère différence d'altitude entre ces deux sondages, respectivement de 4 m et 9 m pour les sondages s3 et s4. D'après la carte géologique au 1 :100 000 (Barruol 1959), le sondage s4 serait situé sur un ancien cordon dunaire (Fig. 3), ce qui expliquerait sa texture davantage sableuse (68% vs 56%).

Dans les parcelles de M. Dalquier, des zones sont envahies par le *Spermacoce globosa*, notamment à proximité des axes de drainage. Nous avons alors effectué trois sondages, les sondages s6 et s7 dans des zones non envahies et le sondage s8 dans une zone envahie par le *Spermacoce globosa*. Comme les deux sondages s7 et s8 sont similaires et différents du sondage s6 (Fig. 7c), nous suggérons l'absence d'une relation entre la présence de *Spermacoce globosa* et un sol particulier. Par contre, la spécificité du sondage s6 par rapport aux sondages s7 et s8 provient très certainement de sa localisation sur un ancien cordon dunaire, ce qui est cohérent avec la carte géologique au 1 :100 000 (Mazéas 1961, Fig. 4), une altitude légèrement plus élevée : 10 m vs 7 et 8 m et une texture très sableuse (96%) (Tab. 1, Tab. 2).

Dans l'exploitation de Bergère, un plateau est entaillé par une légère dépression qui va en direction de la Crique Toussaint. Nous avons effectué deux sondages de part et d'autre de cette dépression, s9 et s10, sans nous attendre à observer de différences. Finalement, le sondage s9 présente davantage de taches et est plus argileux en profondeur que le sondage s10 (Fig. 7d). Cette différence est à relier avec la présence dans le sondage s10 d'un filon de pegmatite (paillettes de mica, quartz) à partir de 40 cm, qui provient peut-être d'une différence de substrat géologique (Fig. 5).

Dans l'exploitation de Dolor, nous avons observé une différence nette entre le sondage s13 (sommet de colline, profil avec une variation rapide de la texture : SA → A → AL → LA) et le sondage s14 (piedmont de colline, profil homogène SA puis AS) (Fig. 7e). Le sondage s13 est typique d'un sol à drainage latéral superficiel, tandis que le sondage s14 est typique d'un sol d'apport par colluvionnement. Ceci suggère alors une réserve en eau respectivement faible et élevée pour les sondages s13 et s14. Une discussion avec M. Dolor a confirmé ce point, la prairie jaunissant et s'asséchant en sommet de colline quelques semaines après le début de la saison sèche.

Dans les parcelles de Van der Berg, quelques zones sont riches en Cypéracées. Nous avons alors effectué deux sondages, le sondage s15 dans une zone sans Cypéracées, et le sondage s16 dans une zone riche en Cypéracées. Nous avons observé des similitudes texturales entre les deux sondages, confirmées par les analyses de sol (S= 82% et 76%) mais aussi des différences de la couleur de la matrice (Hue = 2.5Y vs 10.5YR) et du contraste entre les taches et la matrice (peu contrastées vs contrastées) (Fig. 7f). Ces observations suggèrent l'existence d'une relation entre les Cypéracées et un sol influencé par un battement de nappe. Des sondages complémentaires seraient nécessaires pour confirmer cette relation. Cabidoche (1984) avait aussi observé une relation entre la présence de Cypéracées et la compaction du sol.

3.5. Variabilité des sols suivant l'historique de la végétation avant l'installation des prairies

Lors de nos discussions sur le terrain, nous avons entendu que les sols de prairies installées sur d'anciennes forêts se distinguaient de ceux installés sur d'anciennes savanes. Bien que nous n'ayons pas effectué un protocole expérimental rigoureux pour tester cette hypothèse, nos observations et les analyses de sols permettent toutefois de donner une première réponse.

a) Résultats tirés des observations de terrain

En général, les prairies installées sur des anciennes forêts ont des sols avec une texture moyenne argilo-sableuse ou argileuse. La texture varie progressivement avec la profondeur : elle est plus sableuse en surface et plus argileuse en profondeur. Dans certains sondages, on trouve en profondeur un toucher talqueux qui annonce la présence de limons. Cela est très net pour le sondage s13 (Dolor).

Les prairies installées sur des savanes ont des sols avec des profils texturaux variés. Certains sont similaires à ceux des sols de forêts, par exemple s3 (Buffard, savane) similaire à s1, s2 (Villarsin, forêt) ou bien s4 (Buffard, savane) similaire à s14 (Dolor, forêt). D'autres sols sont argilo-limoneux puis argileux (s11, Joffre). Enfin, d'autres présentent une variation de texture très nette avec la profondeur : sableuse en surface, elle passe brusquement à une texture argileuse ou argilo-limoneuse vers 60 cm de profondeur (s5, lycée agricole ; s6, s7, s8, M. Dalquier). Pour ces 4 sondages, on observe juste en-dessous de l'horizon de surface, un horizon sableux « délavé » et blanchi, ce qui correspond certainement à un processus de podzolisation. Finalement, les profils texturaux des sols de savanes étant variés, distinguer les sols de savanes des sols de forêts sur ce critère serait une généralisation trop forte.

b) Analyses de sols des 14 échantillons à 0-30 cm de profondeur

Les sols installés sur d'anciennes forêts sont principalement sablo-argileux tandis que ceux installés sur d'anciennes savanes sont plus variables : sablo-argileux mais aussi sableux (s6, Dalquier ; s5 : lycée Matiti) et argilo-sablo-limoneux « loam » (s11, Joffre) (Fig. 8a). Cette variabilité s'explique certainement par des particularités des formations sédimentaires sur lesquelles se trouvent les savanes de basse altitude : présence d'anciens cordons littoraux

conduisant à des sols davantage sableux que leur environnement local (s6, Dalquier ; s4, Buffard), argile Coropina dans les zones basses de la série de Coswine (s11, Joffre).

Remarque : nous n'avons pas mis en évidence l'influence du substrat géologique sur la texture du sol de surface (Fig. 8b), contrairement à ce qu'avait pu observer Cabidoche (1984) sur des sols de Guyane destinés aux productions fourragères. Les raisons sont certainement un nombre d'échantillons trop faible et l'utilisation d'une carte géologique pas assez précise pour les sondages effectués au nord-ouest de la Guyane.

La teneur en carbone organique des 14 échantillons varie entre 0,4 et 3% (Tab. 2). Cette variabilité s'explique en partie par la teneur en argile + limons fins (Fig. 9), ce qui est un résultat classique (Feller *et al.* 1981, Zinn *et al.* 2005). Elle s'explique aussi en partie par l'historique des prairies. En effet, des teneurs en carbone plus importantes qu'attendue (connaissant la teneur en argile + limons fins) se trouvent dans des prairies installées sur d'anciennes forêts (s2, Villarsin ; s12, s13, Dolor) (Fig. 9). Ce résultat est à prendre avec précaution vu le faible nombre d'échantillons, mais il mériterait d'être testé sur un jeu de données plus important.

4. Discussion

Peu de sols avec un drainage favorable

Sur les 16 sondages tarière que nous avons étudiés, seulement deux sols sont profonds et ont un drainage satisfaisant, des critères a priori favorables pour les plantes (s4, Buffard ; s14, Dolor). C'est peu ... mais il faut « faire avec ».

Hydromorphie de surface et compaction des sols

Nous avons observé dans la plupart des sondages des taches dès l'horizon de surface ou à partir de 10 cm de profondeur. Ces taches sont dues à un engorgement temporaire du sol qui est visible par de l'eau stagnante à la surface du sol lors d'un épisode pluvieux ou plusieurs heures après.

Pour les prairies qui proviennent d'anciennes savanes, on peut supposer que cet engorgement existait déjà dans ces savanes. En effet, dans des sols de savanes, il existe souvent une limite texturale brusque entre un horizon supérieur drainant et un horizon inférieur peu drainant, ce qui conduit à un engorgement et à la formation d'une nappe perchée lors d'épisodes pluvieux intenses.

Pour les prairies qui proviennent d'anciennes forêts, on peut supposer que cet engorgement est une conséquence du changement d'usage des terres. En effet, en dehors des bas-fonds, ce phénomène est rarement observé en forêt naturelle et est limité à quelques sols de terre ferme qui sont caractérisés par des djougoung-pétés (Blancaneaux 1973). Il est aussi connu que la transformation d'une forêt en une prairie s'accompagne lors de la déforestation d'une compaction du sol et d'une détérioration de la qualité du sol : baisse de la porosité, baisse de la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol qui peut passer de 15 cm.h⁻¹ à 1 cm.h⁻¹ (Martinez & Zinck 2004) ! La compaction du sol est d'autant plus forte que la déforestation aura été mécanisée et réalisée en saison des pluies (Schak-Kirchner *et al.* 2007). La compaction du sol a aussi certainement été favorisée par la présence d'un horizon de surface sableux ou sablo-argileux, qui correspond à une gamme granulométrique très sensible au compactage (Faure & Fies 1972, Cabidoche 1984). Elle a été ensuite maintenue ou accentuée par le surpâturage (Geissen *et al.* 2009) et le passage répété d'engins à moteurs (4x4, tracteurs).

Cette compaction du sol favorise le ruissellement du sol, l'érosion hydrique et la perte de terre. Nous avons observé chez M. Dolor des ravines. Dans le cadre du dispositif Ecerex

en Guyane ou plus généralement sous les tropiques, Sarrailh *et al.* (1989) et Lal (1990) ont montré que l'érosion était faible (0 à 0,07 t/ha/an) sous forêt naturelle. Par contre, les pertes de terre étaient multipliées par 50 lors d'un défrichement mécanisé, pour revenir à un facteur multiplicatif compris entre 2 et 32 lors de l'installation d'une prairie.

Un sol compacté ayant un effet négatif sur la productivité de la végétation (moins oxygéné, réserve en eau plus faible, ...), il est important de retrouver des sols décompactés. Nous recommandons alors (i) de limiter au maximum le passage d'engins dans les parcelles et d'éviter le surpâturage, surtout dans les pentes > 30% (Blanco Sepulveda & Nieuwenhuys 2011); (ii) de favoriser la macrofaune du sol, dont les vers de terre qui labourent naturellement le sol (Darwin 1881, Feller *et al.* 2000). On évitera ainsi l'emploi de pesticides. On peut aussi envisager le passage de griffes pour aérer et décompacter le sol de surface. Ce passage de griffes permet aussi de limiter l'invasion des prairies par les Cypéracées (Cabidoche 1984).

Hydromorphie en profondeur et battement de nappe

Nous avons aussi souvent observé des taches en profondeur. Ces taches sont dues à un engorgement temporaire du sol qui correspond certainement à une zone de battement de nappe. En saison des pluies, cette nappe est une contrainte pour la végétation puisqu'elle est peu propice pour le développement des racines qui ont besoin d'oxygène. Ce point est à moduler puisque nous avons encore observé des racines (mais en faible quantité) en profondeur dans la plupart des sondages. En saison sèche, la présence d'une nappe à faible profondeur peut être un atout pour les plantes en vue de s'alimenter en eau.

Des sols avec une faible réserve en eau : une contrainte atténuée par l'association plantes-arbres ?

Finalement, la plupart des sols que nous avons observés ont un mauvais drainage, l'eau ne s'infiltrant pas rapidement dans le sol, à cause d'horizons de surface compactés et/ou d'horizons à mi- profondeur imperméables (limoneux ou très argileux). En conséquence, une grande partie de l'eau de pluie reste à la surface du sol, s'évapore ou ruisselle, ce qui ne permet pas au sol de reconstituer une grande réserve en eau durant la saison des pluies. Au final, la plupart des sols devrait avoir une faible réserve en eau, ce qui conduit certainement à un stress hydrique des plantes au bout d'un ou deux mois de saison sèche.

Un moyen de palier à cette contrainte pourrait être de planter des arbres dans les pâturages et donc d'aller vers une association plantes-arbres, comme cela est pratiqué par exemple dans le Para, Brésil. En saison sèche, les arbres par leur ombre, limitent l'évapotranspiration et maintiennent un microclimat favorable à la productivité des plantes de prairies (Dulormne *et al.* 2004).

Des sols avec une faible fertilité chimique : une contrainte atténuée par l'association légumineuse-graminées.

Tous les sols guyanais ont naturellement une faible fertilité chimique : pH acide, faible teneur en matière organique, faible quantité en nutriments (Azote, phosphore disponible, potassium, calcium, ...) Il en est de même pour les sols de prairies si aucun amendement n'est apporté.

Il est connu qu'un des moyens d'introduire de l'azote dans un agrosystème est de favoriser les associations entre légumineuses et graminées. Les légumineuses fixent l'azote de l'air grâce à des associations avec des bactéries au sein de leurs nodosités, le transforment en azote minéral (nitrate, ammonium) qui est à terme transféré vers les graminées. Ce type d'association permet alors de limiter les apports en engrais en azote.

Le phosphore est en quantité significative dans les sols tropicaux (dont les sols guyanais) mais une infime partie du phosphore est disponible pour les plantes (Miller *et al.*

2001). En effet, la plus grande partie est adsorbée par les oxydes de fer et/ou d'aluminium (Agbenin 2003, Chacòn *et al.* 2005) ou mobilisé dans la matière organique. Le phosphore est alors considéré comme le principal facteur limitant pour les plantes qui poussent sur des vieux sols tropicaux. Cela est d'autant plus vrai dans les sols argileux pour lesquels la capacité d'adsorption du phosphore est élevée (Bruland & Richardson 2004, Wisawapipat *et al.* 2009). Ce point est aussi à nuancer dans les sols hydromorphes qui sont engorgés une partie de l'année. En effet, lors de ces périodes où le milieu devient anaérobique (absence d'oxygène) et réducteur, le fer est soluble et libère du phosphore qui était adsorbé sur les oxydes de fer (Baldwin & Mitchell, 2000). Une quantité de phosphore redevient alors disponible pour les plantes. Quoi qu'il en soit, cette disponibilité en phosphore s'améliore un peu seulement une partie de l'année. Pour l'améliorer de manière plus régulière et pour diminuer l'apport d'engrais en phosphate, une voie de recherche/développement serait de favoriser une fois de plus l'association entre légumineuses et graminées. En effet, en zone méditerranéenne ou au Japon, des travaux récents ont montré que des associations légumineuses-graminées (par exemple pois chiche-blé dur, niébé-maïs, lupin blanc-maïs...) améliorent la disponibilité en phosphore du sol et les rendements (Hinsinger *et al.* 2011, Betencourt *et al.* 2012, Latati *et al.* 2015, Dissanayaka *et al.* 2015). La légumineuse facilite pour la graminée l'accès à un « pool » de phosphore qui est non disponible si la graminée était plantée en monoculture.

Enfin, notons que quelques parcelles ont des teneurs en carbone organique élevées (exemple : s13, Dolor ; s11, Joffre ; s1, Villarsin). C'est un atout car une forte teneur en carbone organique permet d'atténuer une éventuelle toxicité aluminique, d'augmenter la capacité du sol à échanger des cations (Cabidoche 1984) et par conséquent de limiter les pertes par lixiviation lors d'amendements. Cela confirme aussi qu'il existe une marge de manœuvre et qu'un itinéraire cultural permet d'améliorer les propriétés d'un sol, au moins à sa surface.

Laisser la trace de la forêt

Dans une parcelle anciennement forestière (s13, Delor), les souches d'arbres brûlées sont encore présentes. M. Delor envisageait de les enlever. Si ces souches ne gênent pas, nous préconisons au contraire de les laisser sur place. En effet, cela évitera un passage supplémentaire d'un engin qui va accentuer la compaction des sols. De plus, ces souches et les grosses racines associées se décomposeront avec le temps et seront une source de carbone pour les microorganismes du sol et une source de charbons de bois dans le sol, ce qui peut être favorable pour les sols acides, comme cela a été montré dans des travaux sur les « terra preta » ou les « biochars » (Glaser *et al.* 2002, Novotny *et al.* 2009, Glaser & Birk 2012, Webinaire de S. Abiven <https://vimeo.com/channels/webinairesafes/127171476>)

Enfin, dans cette même parcelle, nous avons encore trouvé des racines mortes d'arbres à 1 m de profondeur. Ces racines non encore décomposées pourraient expliquer en partie pourquoi le stock de carbone de sols de pâturages peut augmenter en profondeur au bout d'une vingtaine d'années après déforestation.

Plus globalement, lors de la déforestation pour installer une prairie, nous rejoignons Cabidoche (1984) qui préconisait un abattage manuel avec des souches laissées en place et les branches brûlées, plutôt qu'un abattage mécanique avec dessouchage : moins onéreux, compaction du sol limitée, et économie d'une année de chaulage grâce à l'effet du brulis (remontée du pH et des cations Ca, Mg, K).

Tableau 1 : Caractéristiques des exploitations, parcelles et identification des sondages tarière correspondants

Exploitation	Historique	Type	Parcelle	Id sondage	Géologie ¹	Topographie	Altitude ² (m)	Prélèvement d'échantillons	
								Dossier 15S055 Identifiant	d.a.
Max Villarsin	Forêt	Essai	Parcelle essais sorgho +cendres	s1	Q ₂	Haut	11	1 (sans apport) 2 (avec apport de cendres en nov. 2013)	
				s2	Q ₂	Bas, vers forêt et pripri	15		
Buffard	Savane	Pâturage	P0L	s3	Q ₂	Replat bas	4	3	
			P0	s4	Q ₂ , cordon	Replat haut	8	4	
Lycée agricole Matiti	Savane	Fauche	F	s5	Q ₂		10	5	
M. Dalquier	Savane	Pâturage	M1	s6	Q ₂ , cordon	Plaine	10	6	
			M3	s7	Q ₂		7		
			M3	s8	Q ₂	Vers axe de drainage, invasion tête nègre	8		
H. Bergère	Forêt	Pâturage	D4	s9	Q ₂	Plateau, s9 et s10 séparés par une dépression perpendiculaire à la crique Toussaint	9	7	
			D5	s10	Q ₃		11	8	
Jean-François Joffre	Savane	Fauche	F	s11	Q ₂		9	9	
Rodrigue	Forêt	Pâturage	Plateforme Wayabo	s12	Q ₃	Sommet d'interfluve	33	10	
Melchiade Delor	Forêt	Pâturage	2	s13	SDB	Sommet de colline	53	11	0-15 cm 15-30 cm
			1	s14	SDB	Piedmont de colline	33	12	
Van der Berg	Savane	Pâturage	Parcelle 4	s15	Q ₂		6	13	
				s16	Q ₂	Riche en Cypéracées	6	14	

¹D'après Boulvert : Q₂ : Série de Coswine ; Q₃ : Série de Démerera ; SDB : Série Détritique de Base²D'après image SRTM à 90 m de résolution. Sur le terrain, l'altitude du sondage s1 est supérieure à celle du sondage s2.

Tableau 2 : Caractéristiques physico-chimiques de 14 échantillons de sols prélevés de 0 à 30 cm de profondeur.

Dossier	No Labo	sondage	Eleveur	EG %	A %	LF %	LG %	SF %	SG %	pH eau	pH KCl	C %	N ‰	C/N	pF2.0 %	Commentaires
15S055	1	s1	Villarsin	0	17	11	10	56	6	4,7	4,1	1,9	1,6	12,2	26	Sans apport de cendres
15S055	2	s1	Villarsin	0	17	12	11	54	7	4,7	4,1	2,4	1,6	14,8	32	Avec apports de cendres en nov. 2013
15S055	3	s3	Buffard	0	26	12	6	56	1	4,9	4,1	1,6	1,3	12,0	28	
15S055	4	s4	Buffard	0	21	6	5	66	2	5,1	4,2	1,4	1,1	12,7	22	
15S055	5	s5	Lycée Matiti	0	3	6	9	81	0	5,6	4,9	0,7	0,6	11,8	22	
15S055	6	s6	Dalquier	0	2	1	1	82	14	6,0	5,2	0,4	0,4	10,5	12	
15S055	7	s9	Bergère	0	11	6	2	50	32	5,5	4,7	1,1	1,0	11,3	15	
15S055	8	s10	Bergère	0	15	10	2	39	34	5,4	4,5	1,4	1,2	12,3	19	
15S055	9	s11	Joffre	0	17	21	13	48	0	5,3	4,3	2,6	1,8	14,3	37	
15S055	10	s12	Rodrigue	0	8	13	16	63	0	5,9	5,0	1,9	1,4	13,5	29	
15S055	11	s13	Dolor	31	27	7	3	13	51	5,6	4,6	3,0	2,2	13,6	31	
15S055	12	s14	Dolor	0	19	2	2	15	62	5,3	4,5	1,6	1,3	12,2	20	
15S055	13	s15	Van der Berg	0	9	3	6	63	19	5,5	4,5	1,1	1,0	10,3	22	
15S055	14	s16	Van der Berg	0	15	5	5	70	6	5,7	4,7	1,0	1,0	10,0	25	

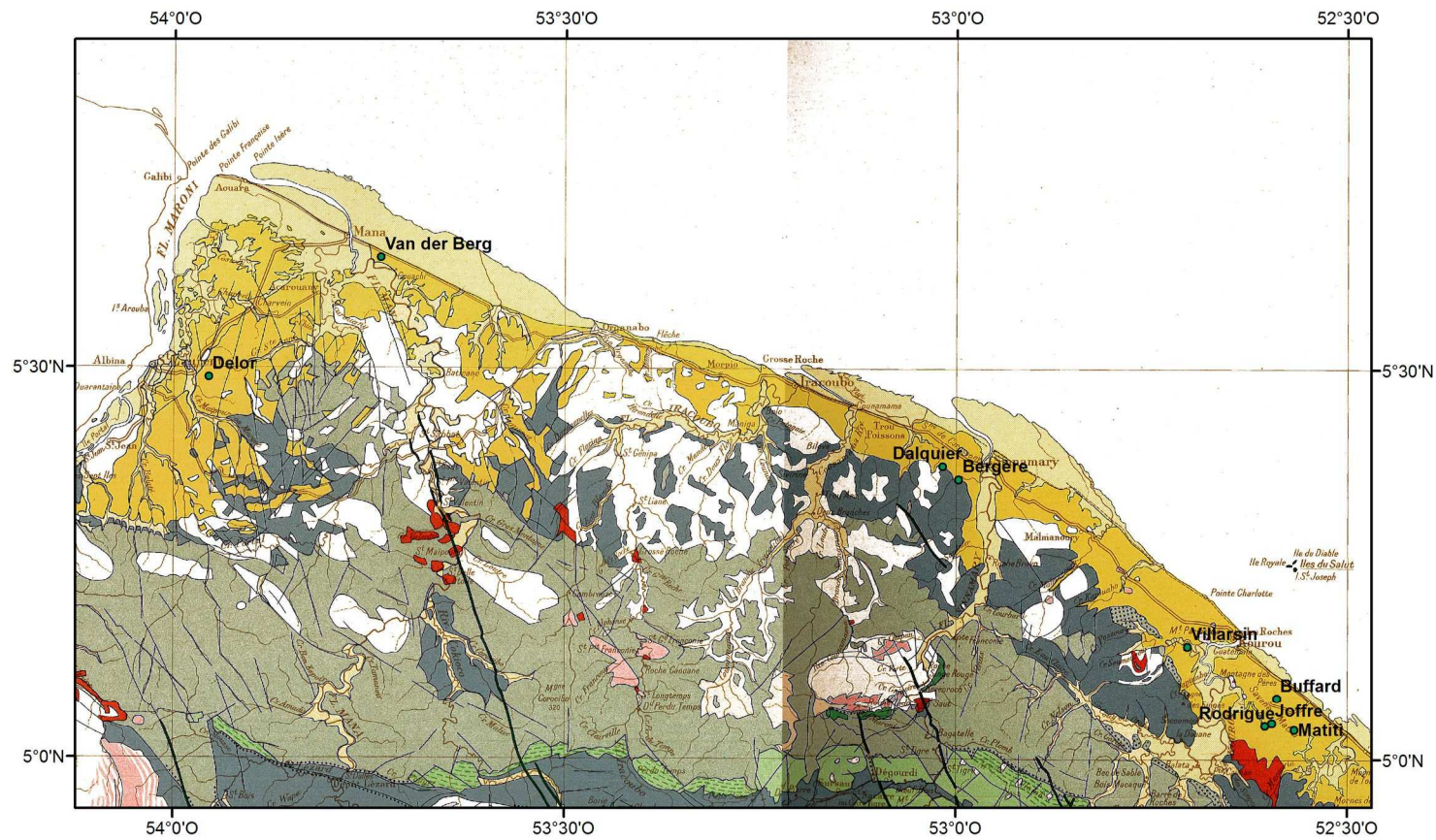


Figure 1 : Localisation des exploitations sur la carte géologique à 1 :500 000 du nord de la Guyane (Choubert)

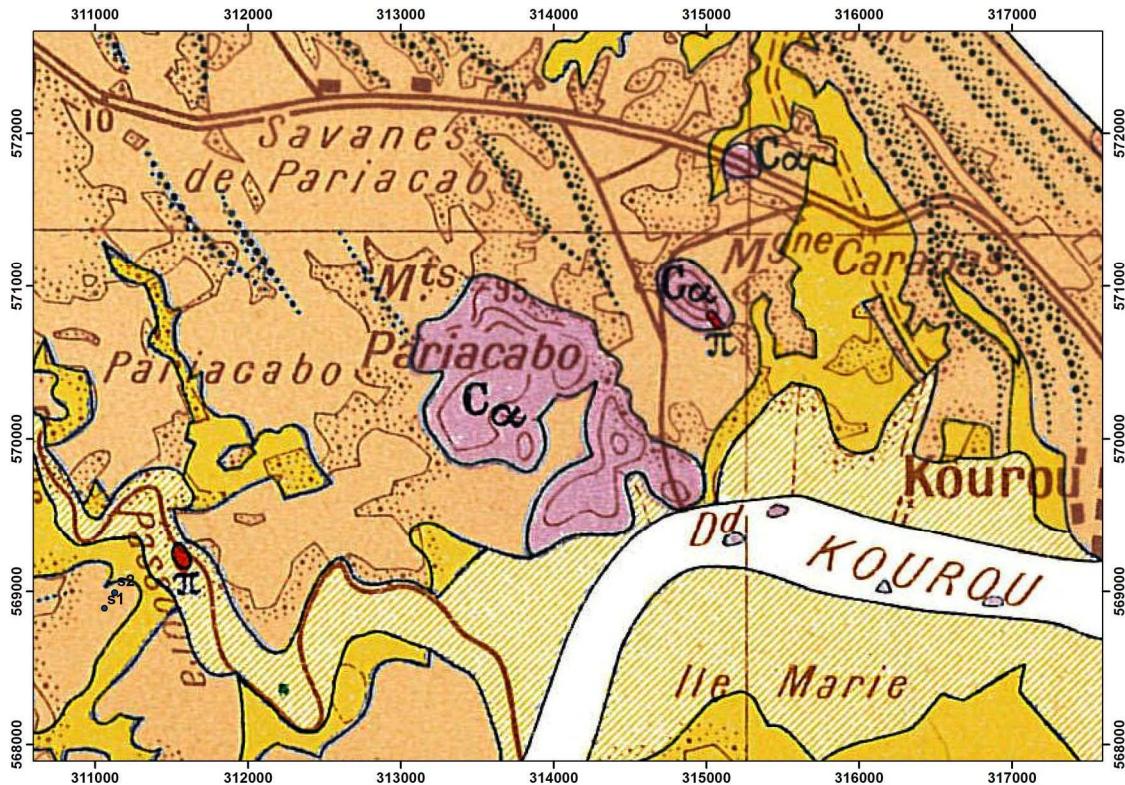


Figure 2 : Localisation des sondages tarières s1 et s2 (Villarsin) sur la carte géologique à 1 : 100 000 de Kourou (Barruol, 1959)

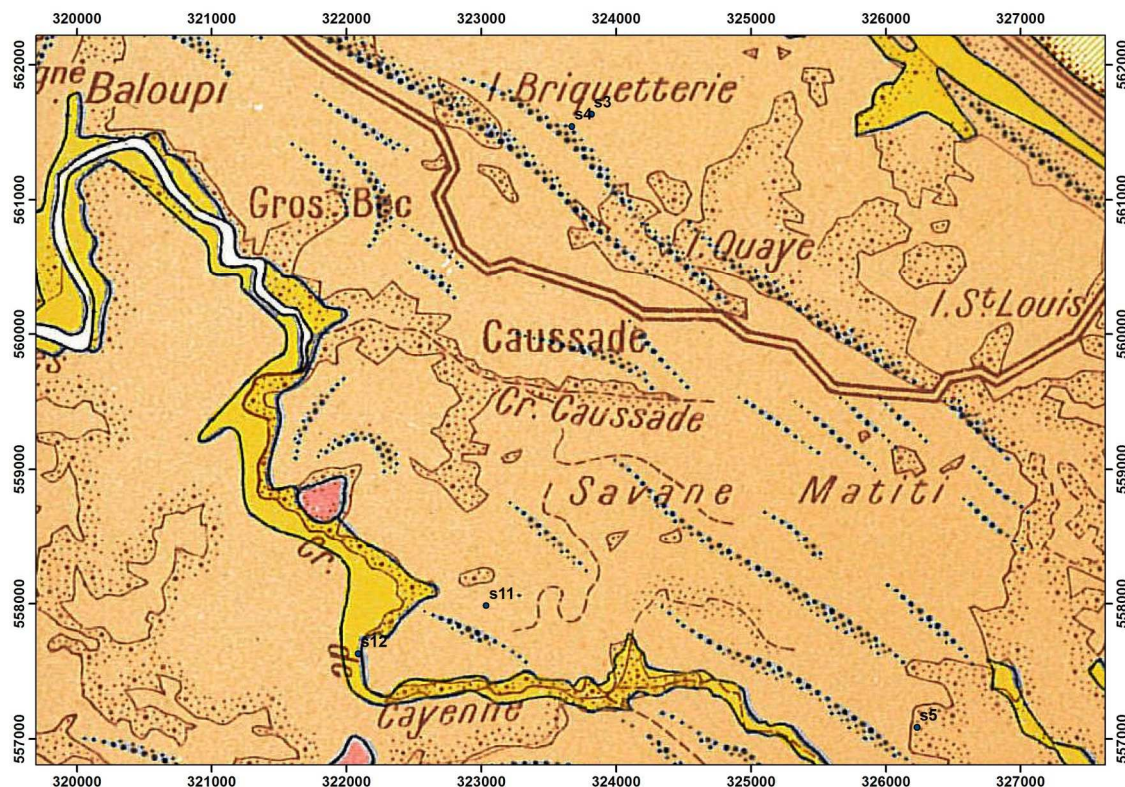


Figure 3 : Localisation des sondages tarières s3, s4 (Buffard), s5 (lycée Matiti), s11 (Joffre) et s12 (Rodrigue) sur la carte géologique à 1 : 100 000 de Kourou (Barruol, 1959)

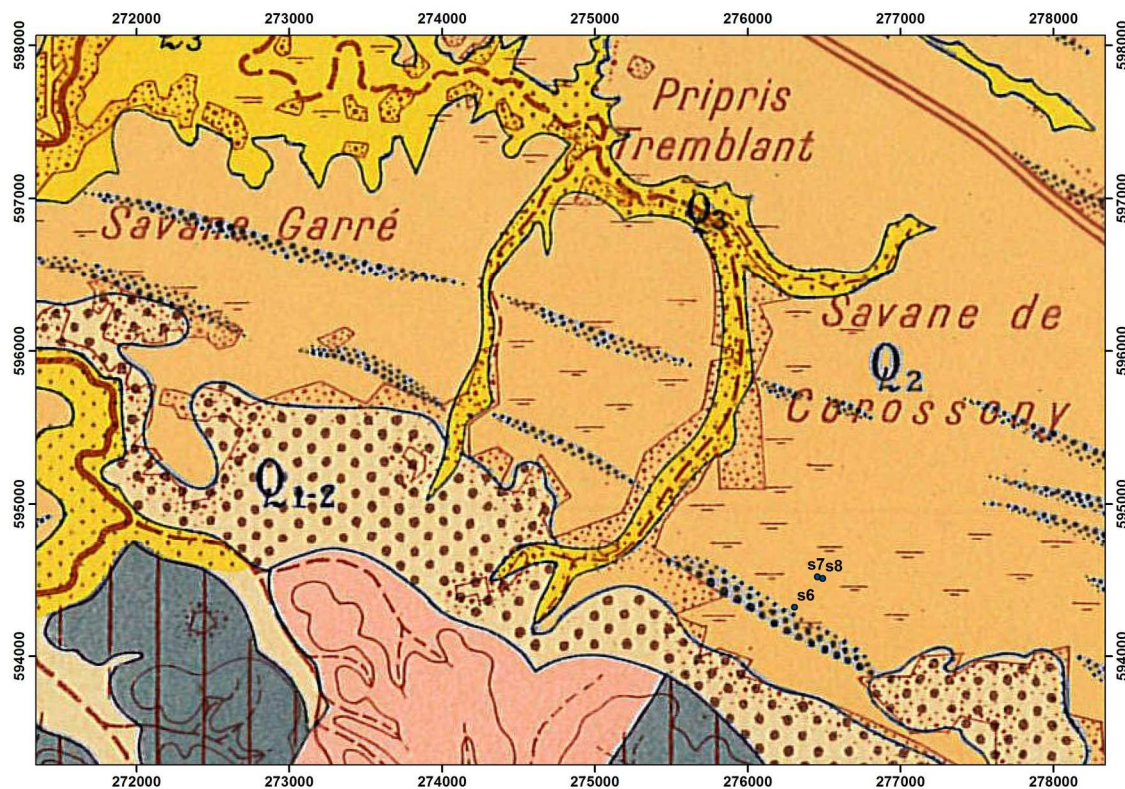


Figure 4 : Localisation des sondages tarières s6, s7 et s8 (Dalquier) sur la carte géologique à 1 : 100 000 d'Iracoubo (Mazéas, 1961)

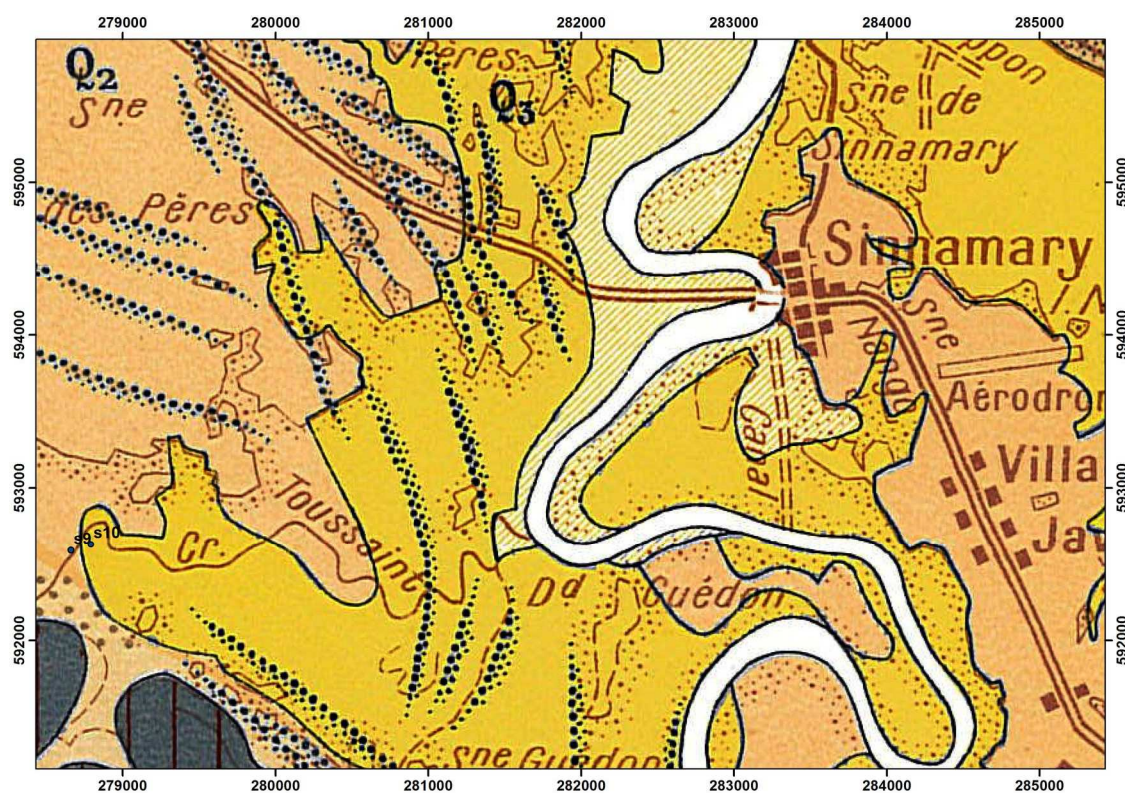


Figure 5 : Localisation des sondages tarières s9 et s10 (Bergère) sur la carte géologique à 1 : 100 000 d'Iracoubo (Mazéas, 1961)

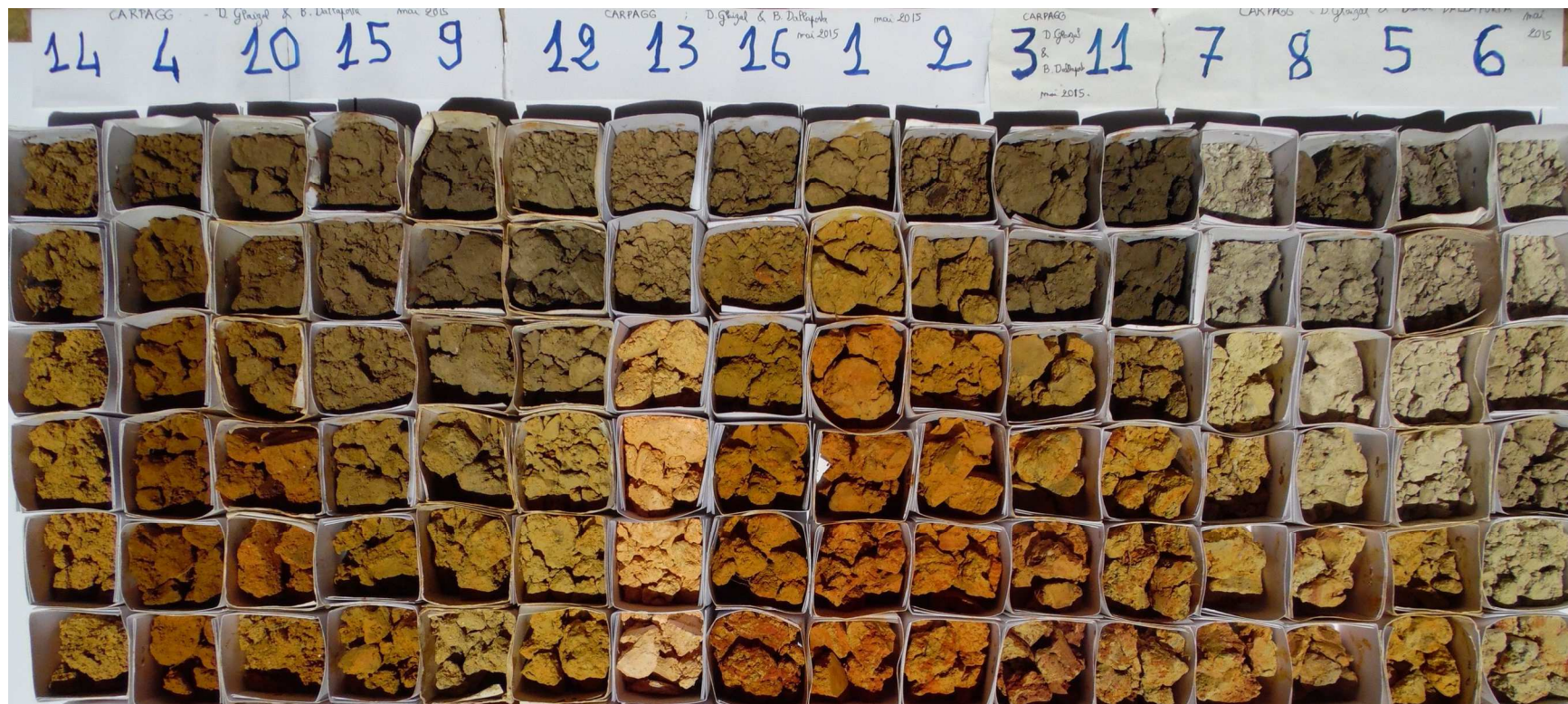


Figure 6 : Sondages tarière s1 à s16 classés suivant un gradient d'hydromorphie :
 Sondages sans tache (gauche) → avec taches (centre) → Avec taches et « délavés » (droite).
 La couleur et la texture sont données en Annexe 2.
 Photo de Bastien Dallaporta.



(a)
Villarsin
s1, s2



(b)
Buffard
s3, s4



(c)
Dalquier
s6, s7, s8



(d)
Bergère
s9, s10



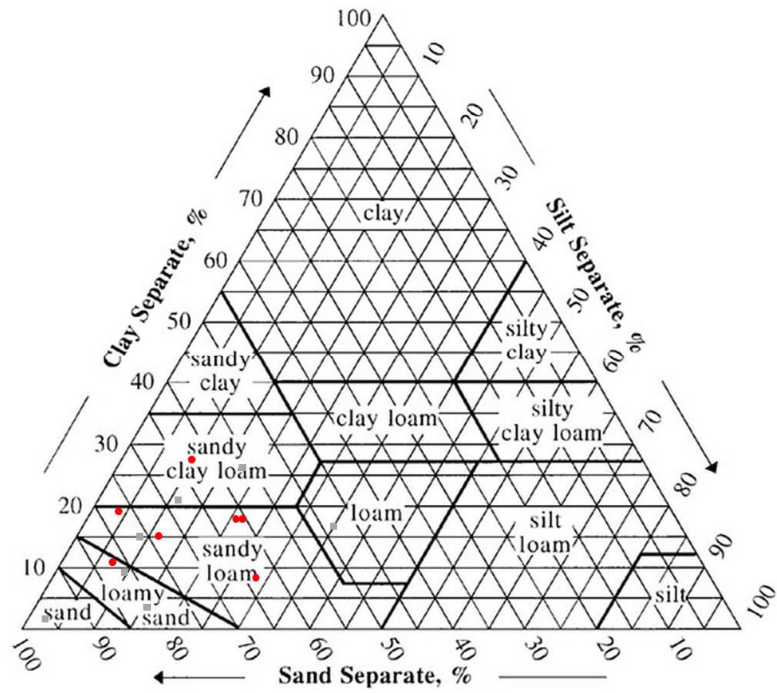
(e)
Delor
s13, s14



(f)
Van der Berg
s15, s16

Figure 7 : Illustration de la variabilité des sols à l'intérieur d'une exploitation
La photo (f) est de Bastien Dallaporta.

(a)



(b)

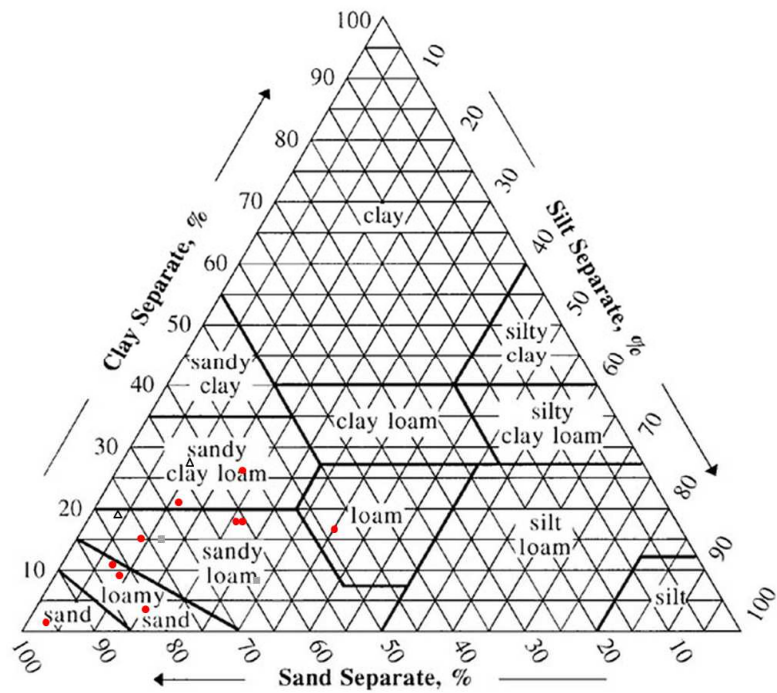


Figure 8 : Distribution de la granulométrie de l'horizon 0-30 cm de 14 sondages tarières (a) en fonction de l'historique (Anciennes forêts : rond rouge, Anciennes savanes : carré gris) ; (b) en fonction de la géologie (Q2, Coswine : rond rouge, Q3, Démerara : carré gris, SDB : triangle)

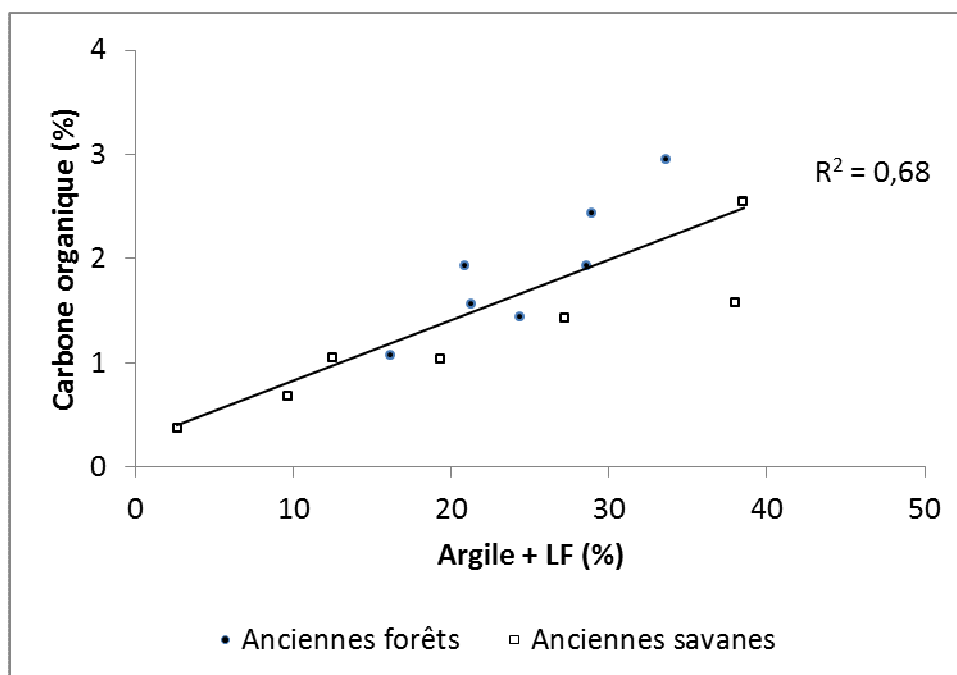


Figure 9 : Relation entre la teneur en carbone et la teneur en matière fine minérale (argile + limons fins) de l'horizon de surface (0-30 cm) de 14 prairies installées sur d'anciennes forêts ou d'anciennes savanes.

Chapitre 2

Formules de passage pour calculer un stock de carbone organique dans un sol (10 novembre 2015)

1. Contexte

Dans la littérature, on trouve différentes formules pour calculer un stock de carbone par unité de surface (unité : tC.ha⁻¹) (Batjes, 1996, Don *et al.* 1997, Grimm *et al.* 2008, Grinand *et al.* 2009, Razakamanarivo *et al.* 2010). Toutes ces formules utilisent la densité apparente d'un sol. Dans le projet Carpagg, le stock de carbone a été calculé sans utiliser la densité apparente d'un sol, ce qui a gêné des reviewers de différentes revues. L'objectif de ce chapitre est de remettre à plat le calcul du stock de carbone d'un sol, en rattachant la formule utilisée dans le projet Carpagg avec celles de la littérature. Pour une plus grande clarté, nous avons différencié le cas particulier où le sol est constitué uniquement de terre fine (< 2 mm) du cas plus général où le sol est constitué de terre fine et d'éléments grossiers.

2. Calcul adopté dans le projet Carpagg

Le stock de carbone par unité de volume, SOC_{stock}, peut être calculé en connaissant seulement deux mesures : la teneur en carbone d'un sol (SOC) et la masse de terre fine par volume d'échantillon (déterminée par exemple par la méthode du cylindre). Le stock de carbone par unité de volume est alors obtenu en multipliant la concentration en carbone (SOC) par la masse de terre fine par volume d'échantillon :

$$\text{SOC}_{\text{stock}} = \frac{\text{SOC}}{[\text{gC.g}_{\text{terre fine}}^{-1}]} \times \frac{m_{\text{terre fine}}}{[\text{g terre fine}]} \times \frac{V_{\text{sol}}^{-1}}{[\text{cm}^{-3}]}$$

Cette formule suffit et est celle qui avait été utilisée dans le projet Carpagg.

3. Cas d'un sol constitué uniquement de terre fine

Pour un sol constitué uniquement de terre fine (< 2 mm), calculer un stock de carbone dans un volume de sol revient à multiplier SOC par la densité apparente du sol (da) (Fig. 10a)

$$\text{SOC}_{\text{stock}} = \frac{\text{SOC}}{[\text{gC.g sol}^{-1}]} \times \frac{da}{[\text{g sol.cm}^{-3}]}$$

Le stock de carbone d'un horizon d'épaisseur e **par unité de surface**, SOC_s, est obtenu en multipliant le stock de carbone par unité de volume par l'épaisseur de l'horizon, ce qui revient à l'équation suivante :

$$\text{SOC}_s = \frac{\text{SOC}}{[\text{gC.g sol}^{-1}]} \times \frac{da}{[\text{g sol.cm}^{-3}]} \times \frac{e}{[\text{cm}]}$$

Changements d'unité :

Si on exprime SOC_s en tC.ha⁻¹ (ou MgC.ha⁻¹), comme 1gC.cm⁻² = 10 kgC.m⁻² = 100tC.ha⁻¹, alors :

$$\text{SOC}_s = \frac{\text{SOC}}{[\text{gC.g sol}^{-1}]} \times \frac{da}{[\text{g sol.cm}^{-3}]} \times \frac{e}{[\text{cm}]} \times 100$$

Si on exprime SOC en « Pour mille » = gC.kg sol⁻¹, alors :

$$\text{SOC}_s = \frac{\text{SOC}}{[\text{gC.kg sol}^{-1}]} \times \frac{da}{[\text{g sol.cm}^{-3}]} \times \frac{e}{[\text{cm}]} \times 100 \times 10^{-3}$$

On retrouve alors la formule utilisée par Grinand *et al.* (2009) qui considéraient les éléments grossiers rarement présents dans leur étude, donc implicitement le sol constitué uniquement de terre fine :

$$\text{SOC}_s = \frac{\text{SOC}}{[\text{gC.kg sol}^{-1}]} \times \frac{da}{[\text{g sol.cm}^{-3}]} \times \frac{e}{[\text{cm}]} \times 0,1$$

Si on exprime l'épaisseur e en m = 100 cm, alors :

$$\text{SOC}_s = \frac{\text{SOC}}{[\text{gC.kg sol}^{-1}]} \times \frac{da}{[\text{g sol.cm}^{-3}]} \times \frac{e}{[\text{cm}]} \times 100 \times 10^{-3} \times 100$$

$$[\text{tC.ha}^{-1}] \quad [\text{gC.kg sol}^{-1}] \quad [\text{g sol.cm}^{-3}] \quad [\text{m}]$$

Finalement :

$$\text{SOC}_s = \text{SOC} \times \text{da} \times e \times 10$$

$$[\text{tC.ha}^{-1}] \quad [\text{gC.kg sol}^{-1}] \quad [\text{g sol.cm}^{-3}] \quad [\text{m}]$$

On retrouve la formule du GIEC, dans le cas où les éléments grossiers sont absents.

4. Cas général d'un sol constitué de terre fine et d'éléments grossiers

Pour un sol constitué de terre fine (< 2 mm) et d'éléments grossiers (> 2 mm), calculer un stock de carbone dans un volume de sol revient à multiplier SOC :

- Soit par la **densité apparente du sol** (da_s) et par un facteur correctif qui dépend de la **proportion massique d'éléments grossiers**, f_{EGm} ($f_{\text{EGm}} = m_{\text{EG}} \times m_{\text{sol}}^{-1}$) (Fig. 10b) :

$$\text{SOC}_{\text{stock}} = \text{SOC} \times \text{da}_s \times (1 - f_{\text{EGm}})$$

$$[\text{gC.cm}^{-3}] \quad [\text{gC.g terre fine}^{-1}] \quad [\text{g sol.cm}^{-3}] \quad [\text{sans dimension}]$$

- Soit par la **densité apparente de la terre fine** (da_{tf}) et par un facteur correctif qui dépend de la **proportion volumique d'éléments grossiers**, f_{EGv} ($f_{\text{EGv}} = V_{\text{EG}} \times V_{\text{sol}}^{-1}$) (Fig. 10b) :

$$\text{SOC}_{\text{stock}} = \text{SOC} \times \text{da}_{\text{tf}} \times (1 - f_{\text{EGv}})$$

$$[\text{gC.cm}^{-3}] \quad [\text{gC.g terre fine}^{-1}] \quad [\text{g tf.cm}^{-3}] \quad [\text{sans dimension}]$$

Le stock de carbone d'un horizon d'épaisseur e **par unité de surface**, SOC_s , est obtenu en multipliant le stock de carbone par unité de volume par l'épaisseur de l'horizon, ce qui revient à l'équation suivante :

$$\text{SOC}_s = \text{SOC} \times \text{da}_{\text{tf}} \times (1 - f_{\text{EGv}}) \times e$$

$$[\text{gC.cm}^{-2}] \quad [\text{gC.g terre fine}^{-1}] \quad [\text{g tf.cm}^{-3}] \quad [\text{sans dimension}] \quad [\text{cm}]$$

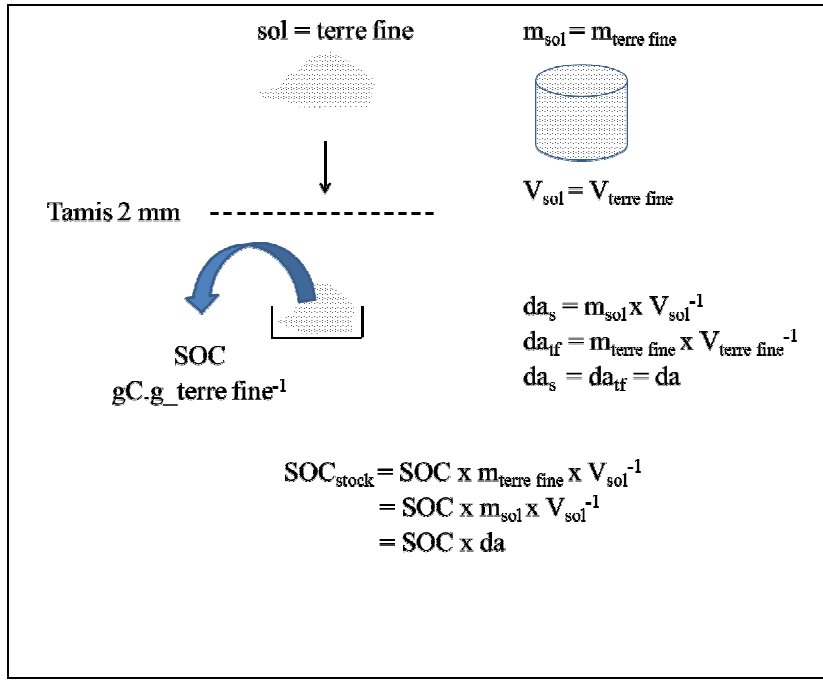
Changements d'unité :

Si on exprime SOC_s en tC.ha^{-1} , SOC en « Pour mille » et l'épaisseur e en $\text{m} = 100 \text{ cm}$ alors :

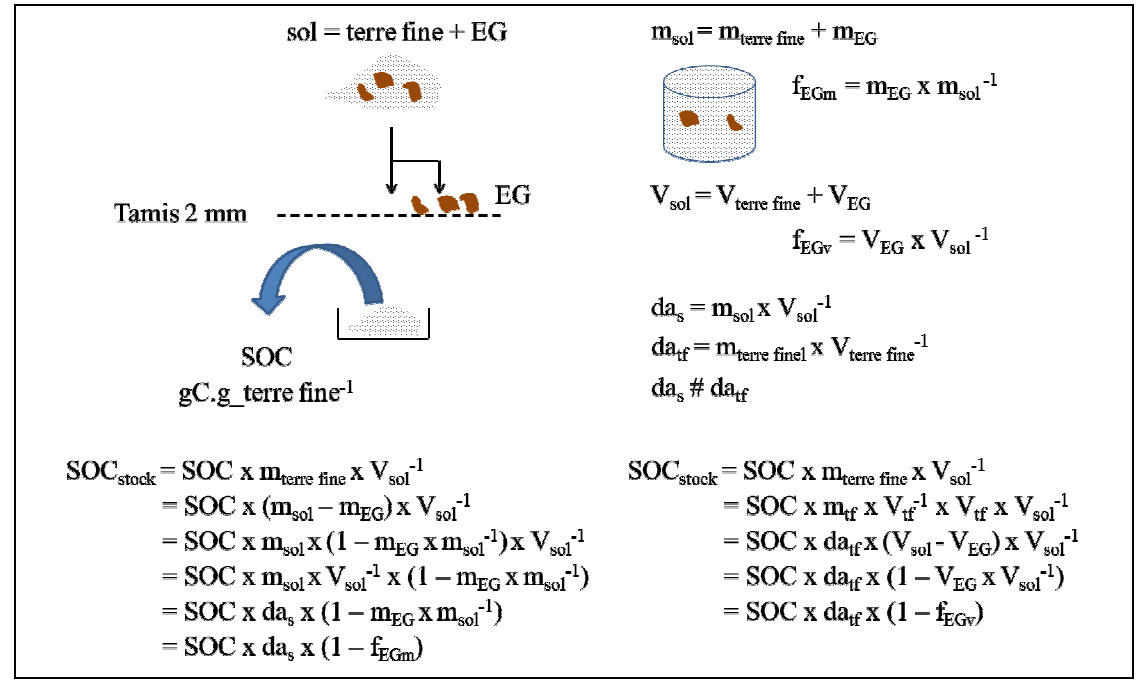
$$\text{SOC}_s = \text{SOC} \times \text{da}_{\text{tf}} \times (1 - f_{\text{EGv}}) \times e \times 10$$

$$[\text{tC.ha}^{-1}] \quad [\text{gC.kg terre fine}^{-1}] \quad [\text{g tf.cm}^{-3}] \quad [\text{sans dimension}] \quad [\text{m}]$$

On retrouve alors la formule du GIEC, à la différence près que cette dernière considère la densité apparente du sol alors qu'il faut considérer la densité apparente de la terre fine.



(a)



(b)

Figure 10 : Calcul du stock de carbone (SOC_{stock}), à partir des mesures de la teneur en carbone (SOC) et de la méthode du cylindre. (a) Cas où le sol est constitué uniquement de terre fine ; (b) Cas où le sol est constitué de terre fine et d'éléments grossiers. Le stock de carbone peut être calculé suivant 2 formules, l'une étant fonction de la densité apparente du sol (da_s) et de la fraction massique des éléments grossiers (f_{EGm}), l'autre étant fonction de la densité apparente de la terre fine (da_{tf}) et de la fraction volumique des éléments grossiers (f_{EGv}).

Chapitre 3

Description de deux profils de sols de prairies de référence : Mornand et Bergère (Terrain, mars 2010)

1. Contexte

En mars 2010, lors d'une mission en Guyane pour démarrer sur le terrain le projet Carpagg (Annexe 3), j'avais décrit deux profils de sols de prairies à proximité des deux tours à flux qui avaient été installées chez deux éleveurs : Bergère et Mornand. Un rattachement au système de classification international des sols (WRB) avait alors été proposé. Il devait être validé par des analyses de sols à partir d'échantillons qui avaient été prélevés et séchés à l'air libre. Un budget non prévu et d'autres priorités étant passées par là, ces échantillons de sols ont été oubliés et finalement ressortis de l'oubli en 2015 pour être analysés au laboratoire du Cirad.

Nous restituons dans ce chapitre la description de ces deux profils de sols et les analyses associées.

2. Matériel & Méthode

Les deux profils se situent au nord de la Guyane, sur le littoral. Ils se trouvent sur le socle précambrien, juste à la limite des formations sédimentaires du quaternaire, plus précisément Bergère sur schiste Bonidoro et Mornand sur granite Galibi (Fig. 11). Ces prairies ont été installées après une étape de déforestation.

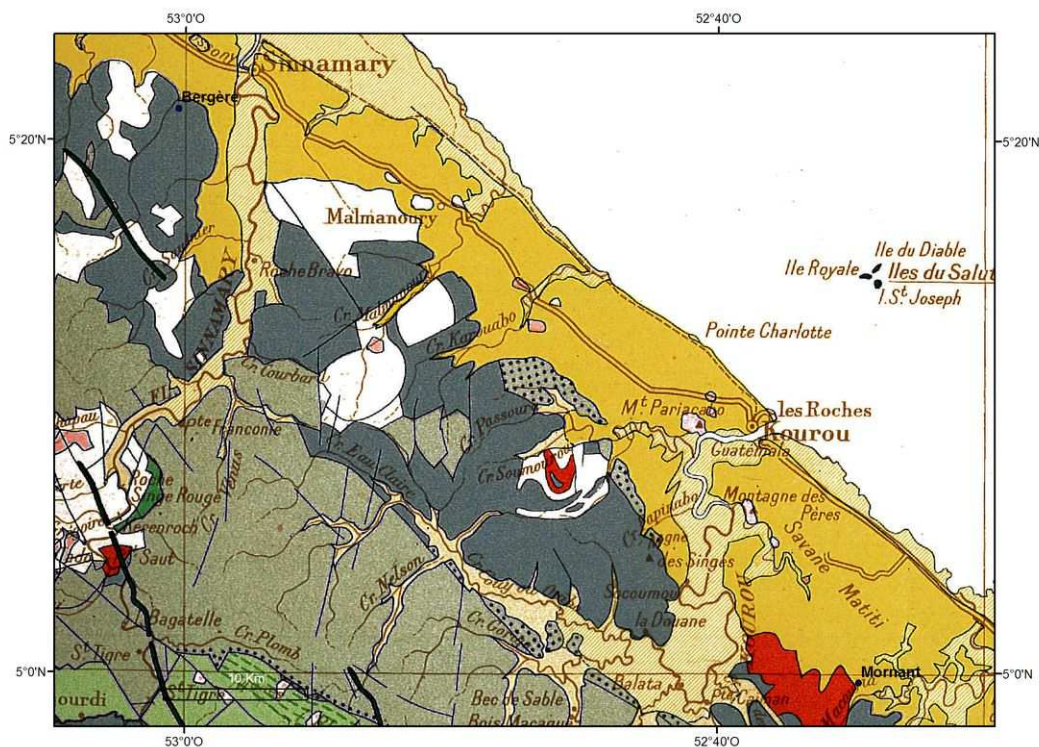


Figure 11 : Localisation des deux profils sur la carte géologique au 1 :500 000 du nord de la Guyane (Choubert,)

3. Résultats

La description des deux profils et les analyses de sols associées sont restituées dans les Annexes 4 et 5.

Le profil de Bergère est homogène. Il a une texture principalement sablo-argileuse (sandy clay loam). Nous avons toutefois observé un ventre d'argile avec une teneur maximale en argile à 25 cm de profondeur (Fig. 12a). A 60 cm de profondeur, les éléments totaux les plus abondants sont Al, Fe puis Si. Nous avons rattaché ce profil à un Geric Ferralsol (Annexe 4). La valeur de P disponible à 0-5 cm de profondeur est exceptionnellement élevée (295 mg/kg). L'origine de cette valeur pourrait être : une erreur du laboratoire, l'apport d'engrais P et sinon, la présence d'une espèce particulière dans les pâturages, certainement une légumineuse, qui mobiliserait une partie du phosphore total en le rendant disponible pour les autres plantes. A suivre ...

Le profil de Mornand est plus hétérogène. Il a aussi une texture principalement sablo-argileuse avec un ventre d'argile et une teneur maximale en argile à 130 cm de profondeur (Fig. 12b). Nous avons observé des taches d'oxydation dans l'horizon sub-superficiel et des interpénétrations d'horizons, ce qui suggère une déforestation récente (compaction, dessouchage, ...). A 180 cm de profondeur, les éléments totaux les plus abondants sont Si, Al, Fe puis K. Ce résultat est à cohérent avec l'observation de granite altéré à partir de 160 cm de profondeur, et suggère la présence d'un sol relativement jeune. Nous avons rattaché ce profil à un Gleyic Acrisol (Annexe 5).

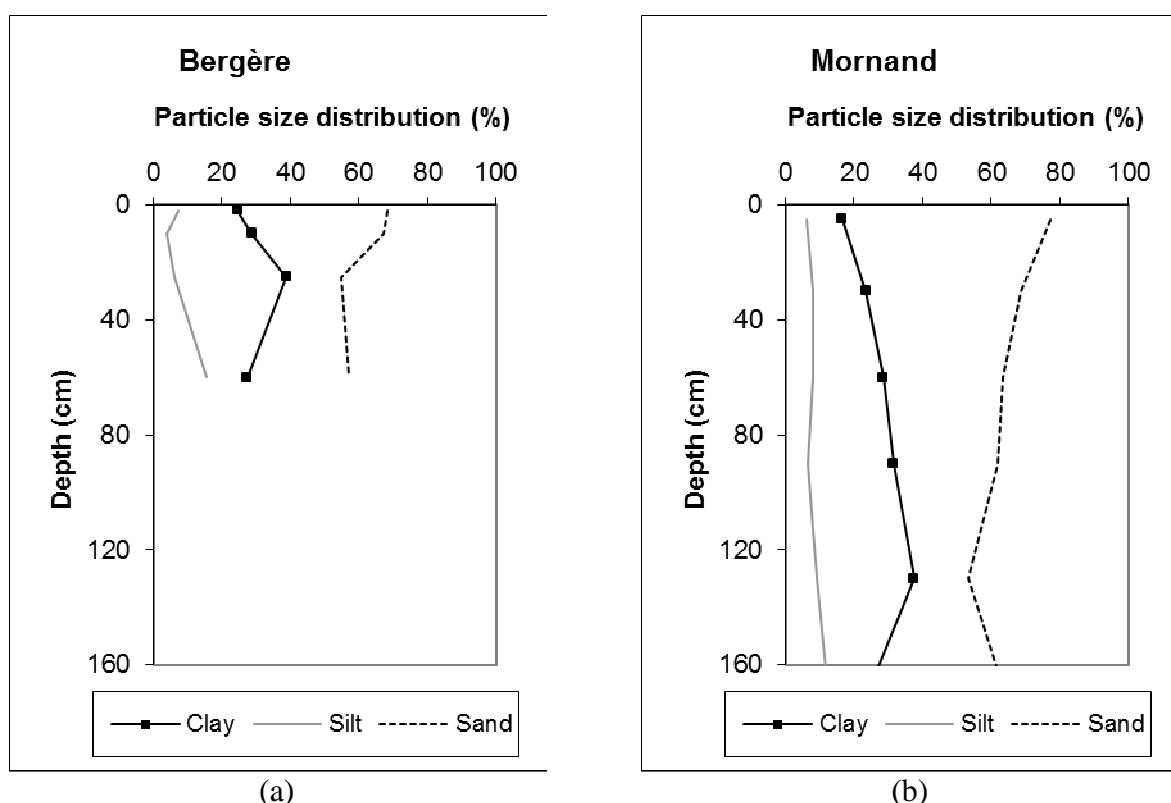


Figure 12 : Granulométrie en fonction de la profondeur des profils de sols de (a) Bergère ; (b) et de Mornand

Chapitre 4
Les déterminants environnementaux et édaphiques de la teneur en carbone du
sol. Bibliographie et résultats (Guyafor, Paracou)
(Exposé à l'Umr Ecofog, 19 mars 2010)

Voir **Annexe 7**.

BIBLIOGRAPHIE

- Agbenin J.O. (2003). Extractable iron and aluminum effects on phosphate sorption in a savanna alfisol. *Soil Science Society of America Journal*, **67**, 589-595.
- Baldwin D.S. & Mitchell A.M. (2000). The effects of drying and re-flooding on the sediment and soil nutrient dynamics of lowland river-floodplain systems: a synthesis. *Regul. Rivers: Res. Mgmt*, **16**, 457-467.
- Batjes, N. H. (1996). Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, **47**, 151-163.
- Betencourt, E., Duputel, M., Colomb, B., Desclaux, D., and Hinsinger, P. (2012). Intercropping promotes the ability of durum wheat and chickpea to increase rhizosphere phosphorus availability in a low P soil. *Soil Biology & Biochemistry* **46**, 181-190.
- Blancaneaux, P. (1973). Notes de pédologie guyanaise. Les Djougoung-Pété du bassin-versant expérimental de la crique Grégoire (Sinnamary - Guyane Française). *Cah. ORSTOM, série Pédol.* **XI**, 29-42.
- Bruland G.L. & Richardson C.J. (2004). A spatially explicit investigation of phosphorus sorption and related soil properties in two riparian wetlands. *Journal of Environmental Quality*, **33**, 785-794.
- Chacón N., Dezzio N., Muñoz B., Rodríguez J.M. (2005). Implications of soil organic carbon and the biogeochemistry of iron and aluminum on soil phosphorus distribution in flooded forests of the lower Orinoco River, Venezuela. *Biogeochemistry*, **73**, 555-566.
- Chadwick, O. A., Derry, L. A., Vitousek, P. M., Huebert, B. J., and Hedin, L. O. (1999). Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development. *Nature* **397**, 491-497.
- Darwin, C. (1881). The formation of vegetable mould through the action of worms with some observations on their habits. Murray, London. 298 p.
- Dissanayaka, D. M. S. B., Maruyama, H., Masuda, G., and Wasaki, J. (2015). Interspecific facilitation of P acquisition in intercropping of maize with white lupin in two contrasting soils as influenced by different rates and forms of P supply. *Plant and Soil* **390**, 223-236.
- Don, A., Schumacher, J., Scherer-Lorenzen, M., Scholten, T., and Schulze, E. D. (2007). Spatial and vertical variation of soil carbon at two grassland sites - Implications for measuring soil carbon stocks. *Geoderma*, **141**, 272-282.
- Dulormne, M., Sierra, J., Bonhomme, R., and Cabidoche, Y. M. (2004). Seasonal changes in tree-grass complementarity and competition for water in a subhumid tropical silvopastoral system. *European Journal of Agronomy* **21**, 311-322.
- Feller, C., Fritsch, E., Poss, R., and Valentin, C. (1991) Effet de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'Ouest, en particulier). *Cahiers Ortsom, Série Pédologie*, **XXVI**, 25-36

Feller, C., Brown, G. G., and Blanchart, E. (2000). Darwin et le biofonctionnement des sols. *Etude et Gestion des Sols* **7**, 395-402.

Geissen, V., Sanchez-Hernandez, R., Kampichler, C., Ramos-Reyes, R., Sepulveda-Lozada, A., Ochoa-Goana, S., de Jong, B. H. J., Huerta-Lwanga, E., and Hernandez-Daumas, S. (2009). Effects of land-use change on some properties of tropical soils - An example from Southeast Mexico. *Geoderma*, **151**, 87-97.

Glaser, B., Lehmann, J., and Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - a review. *Biology and Fertility of Soils* **35**, 219-230.

Glaser B and Birk J J (2012). State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Indio). *Geochimica Et Cosmochimica Acta* **82**, 39-51.

Grimm, R., Behrens, T., Märker, M., and Elsenbeer, H. (2008). Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island – Digital soil mapping using Random Forest analysis. *Geoderma*, **146**, 102-113

Grinand, C., Rajaonarivo, A., Bernoux, M., Pajot, V., Brossard, M., Razafimbelo, T., Albrecht, A., and Le Martret, H. (2009). Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar. *Etude et Gestion des Sols*, **16**, 23-33

Hinsinger, P., Betencourt, E., Bernard, L., Brauman, A., Plassard, C., Shen, J., Tang, X., and Zhang, F. (2011). P for Two, Sharing a Scarce Resource: Soil Phosphorus Acquisition in the Rhizosphere of Intercropped Species. *Plant Physiology* **156**, 1078-1086.

Latati, M., Blavet, D., Alkama, N., Laoufi, H., Drevon, J. J., Gerard, F., Pansu, M., and Ounane, S. M. (2014). The intercropping cowpea-maize improves soil phosphorus availability and maize yields in an alkaline soil. *Plant and Soil* **385**, 181-191.

Martinez, L. J., and Zinck, J. A. (2004). Temporal variation of soil compaction and deterioration of soil quality in pasture areas of Colombian Amazonia. *Soil & Tillage Research* **75**, 3-17.

Miller A.J., Schuur E.A.G., Chadwick O.A. (2001). Redox control of phosphorus pools in Hawaiian montane forest soils. *Geoderma*, **102**, 219-237.

Novotny E H, Hayes M H B, Madari B E, Bonagamba T J, deAzevedo E R, de Souza A A, Song G X, Nogueira C M and Mangrich A S (2009). Lessons from the Terra Preta de Indios of the Amazon Region for the Utilisation of Charcoal for Soil Amendment. *J. Braz. Chem. Soc.* **20**, 1003-1010.

Razakamanarivo, R. H., Razafindrakoto, M. A., and Albrecht, A. (2010). Fonction puits de carbones des taillis d'Eucalyptus à Madagascar. *Bois et forêts des tropiques*, 305, 5-19.

Richardson, S. J., Peltzer, D. A., Allen, R. B., McGlone, M. S., and Parfitt, R. L. (2004). Rapid development of phosphorus limitation in temperate rainforest along the Franz Josef soil chronosequence. *Oecologia* **139**, 267-276.

Sarrailh, J. M. (1990). Les parcelles élémentaires à ECEREX. Etude du ruissellement et de l'érodion sous forêt naturelle et sous prairie. In "Mise en valeur de l'écosystème forestier guyanais. Opération ECEREX." (J. M. Sarrailh, Ed.), pp. 87-101. INRA, CTFT, Paris, Nogent-sur-Marne.

Schack-Kirchner, H., Fenner, P. T., and Hildebrand, E. E. (2007). Different responses in bulk density and saturated hydraulic conductivity to soil deformation by logging machinery on a Ferralsol under native forest. *Soil Use and Management* **23**, 286-293.

Wisawapipat W., Kheuruenromne I., Suddhiprakarn A., Gilkes R.J. (2009). Phosphate sorption and desorption by Thai upland soils. *Geoderma*, 153, 408-415. Glaser B, Lehmann J and Zech W 2002 Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - a review. *Biology and Fertility of Soils* **35**, 219-230.

Zinn, Y. L., Lal, R. and Resk, D. V. S. (2005) Texture and organic carbon relations described by a profile pedotransfer function for Brazilian Cerrado soils. *Geoderma*. **127**, 168-173

**Annexe 1 – Calendrier d’une mission de V. Freycon en Guyane
19 mai au 2 juin 2015**

Jour	Matin	Après-midi
Mardi 19 mai	Voyage Montpellier-Paris-Cayenne	
Mercredi 20 mai	Projet Carpagg : Prospection sols de prairies (s1 à s12)	
Jeudi 21 mai	Villarsin, Buffard, Lycée Matiti, Dalquier, Bergère, Joffre, Rodrigue	
Vendredi 22 mai	Projet Imbalance-P : Terrain	Projet FEADER « Plantations » Réunion avec E. Nicolini
Samedi 23 mai		
Dimanche 24 mai	Projet Carpagg : Synthèse sols de prairies	
Lundi 25 mai	Projet Imbalance-P : Terrain	
Mardi 26 mai		
Mercredi 27 mai		
Jeudi 28 mai		
Vendredi 29 mai		
Samedi 30 mai	Projet Carpagg : Prospection sols de prairies (s13 à s16) Dolor, Van der Berg	
Dimanche 31 mai		
Lundi 1 juin	Projet Imbalance-P : Restitution	Voyage Cayenne-Paris
Mardi 2 juin	Voyage Paris-Montpellier	

Annexe 2 – Caractéristiques des sondages tarières effectués sur les sols de prairies en mai 2015 ((Appui à D. Glaizal)

Sondage	Profondeur	Texture	Couleur	Couleur 2	Couleur 3	Racines	Vers terre
s1	0-10	SA	2.5Y5/4	10YR6/8	10YR4/2	x	
s1	10-20	AS	2.5Y6/8	7.5YR6/8		x	
s1	20-40	A	5YR5/8	2.5YR5/8			
s1	40-60	A	2.5YR5/8	10R5/8	10YR7/8		
s1	60-80	A	10R5/8	7.5YR6/8			
s1	80-100	A	10R5/8	7.5YR6/8	2.5Y8/6		
s2	0-10	SA	10YR4/3			x	
s2	10-20	AS	10YR5/6	10YR5/3		x	
s2	20-40	AS	10YR6/6	7.5YR6/8		x	
s2	40-60	A	7.5YR5/8	2.5YR4/8	10YR4/3		
s2	60-80	A	10YR6/8	2.5YR5/8			
s2	80-100	A	10YR6/8	10R5/8		x	
s3	0-10	SA	10YR4/1	7.5YR4/6		x	
s3	10-20	SA	10YR4/2	7.5YR4/4		x	
s3	20-40	A	10YR6/6	5YR5/8	10YR5/2	x	
s3	40-60	A	2.5Y7/6	2.5YR4/8	2.5Y7/3		
s3	60-80	A	2.5Y7/6	2.5YR5/8	10R4/6		
s3	80-100	A	2.5Y6/4	10R3/6	2.5Y7/6	x	
s4	0-10	SA	10YR4/3			x	
s4	10-20	SA	10YR4/3			x	
s4	20-40	AS	7.5YR4/6			x	
s4	40-60	AS	7.5YR5/6			x	
s4	60-80	AS	7.5YR5/6			x	
s4	80-100	A	7.5YR5/8			x	
s5	0-10	S	10YR4/1			x	
s5	10-20	S	10YR7/2			x	
s5	20-40	S	2.5Y8/2			x	
s5	40-60	S	2.5Y7/2			x	
s5	60-80	SA	2.5Y6/4	7.5YR6/8	2.5Y3/3	x	
s5	80-100	AS	2.5Y8/4	7.5YR5/8	2.5Y5/2		
s6	0-10	S	10YR7/2	10YR7/1		x	
s6	10-20	S	10YR7/2			x	
s6	20-40	S	2.5Y6/3				
s6	40-60	S	2.5Y6/2				
s6	60-80	SA	2.5Y7/2	2.5Y7/6		x	
s6	80-100	AS	2.5Y7/2	2.5YR5/8		x	
s7	0-10	S	2.5Y7/2	2.5Y5/1		x	
s7	10-20	S	2.5Y6/1			x	
s7	20-40	S	2.5Y8/4			x	

s7	40-60	LA	10YR6/8	10YR5/3	2.5Y7/8	x	
s7	60-80	LA	10YR6/8	2.5YR4/8	2.5Y8/4		
s7	80-100	AL	10YR6/8	2.5YR4/8	2.5Y8/6	x	
s8	0-10	S	10YR3/1	10YR7/2		x	
s8	10-20	S	10YR6/1	10YR4/1		x	
s8	20-40	S	10YR8/2	10YR6/2			
s8	40-60	AL	2.5Y7/2	10YR7/8			
s8	60-80	LA	2.5Y8/4	2.5Y7/8	7.5YR6/8		
s8	80-100	L(A)	7.5YR7/6	2.5Y8/6	5YR5/8		
s9	0-10	SA	10YR3/1			x	
s9	10-20	SA	10YR4/2	10YR4/4		x	
s9	20-40	AS	10YR5/3	10YR5/8			
s9	40-60	AS	2.5Y7/4	10YR6/8	2.5Y6/2	x	
s9	60-80	A	10YR6/6	5YR5/8	10YR5/2	x	
s9	80-100	AL	2.5Y7/4	2.5Y7/6	5YR6/8	x	
s10	0-10	SA	10YR4/3			x	x
s10	10-20	SA	10YR3/2			x	
s10	20-40	AS	2.5Y5/3	7.5YR5/8		x	
s10	40-60	A	5YR5/8	2.5Y5/3	2.5Y3/1		
s10	60-80	AS	5YR6/8	10YR7/8	2.5YR4/8		
s10	80-100	SA	10YR6/8	5YR6/8		x	
s11	0-10	AL	10YR2/1			x	x
s11	10-20	AL	10YR2/1	7.5YR3/4		x	
s11	20-40	AL	10YR6/3	10YR7/6	7.5YR6/8	x	
s11	40-60	A	10YR7/6	2.5Y7/6	2.5YR5/8	x	
s11	60-80	A	2.5Y7/6	2.5YR5/8	7.5YR6/8	x	
s11	80-100	A	2.5Y7/4	5YR5/8		x	
s12	0-10	SA	10YR5/2	10YR2/1		x	
s12	10-20	SA	10YR5/2	10YR2/1		x	
s12	20-40	SA	10YR5/3			x	
s12	40-60	SA	2.5Y6/4	7.5YR6/8			
s12	60-80	AS	10YR6/6	5YR5/8			
s12	80-100	A	10YR6/8	2.5Y7/6		x	
s13	0-10	SA	10YR3/3			x	
s13	10-20	SA	10YR4/3			x	
s13	20-40	A	7.5YR6/8			x	
s13	40-60	A	2.5YR6/8			x	
s13	60-80	AL	5YR7/8	10YR7/6			
s13	80-100	AL	5YR7/8				
s13	100-120	LA	5YR7/6				
s14	0-10	SA	10YR4/3			x	
s14	10-20	SA	10YR4/4			x	
s14	20-40	AS	10YR5/6			x	

s14	40-60	AS	10YR5/6			x	
s14	60-80	AS	10YR5/6			x	
s14	80-100	AS	10YR5/6			x	
s14	100-120	AS	10YR5/6			x	
s15	0-10	SA	2.5Y3/2			x	
s15	10-20	SA	2.5Y3/2			x	
s15	20-40	SA	2.5Y5/3			x	
s15	40-60	SA	2.5Y6/6	2.5YR5/8		x	
s15	60-80	AS	10YR6/8	2.5Y5/3		x	
s15	80-100	AS(L)	10YR6/8	5YR5/8		x	
s15	100-120	AS(L)	10YR5/6	5YR5/8	2.5Y6/2	x	
s16	0-10	SAL	10YR4/2			x	
s16	10-20	SAL	10YR4/3			x	
s16	20-40	S(A)	10YR5/6			x	
s16	40-60	AS	10YR5/6			x	
s16	60-80	AS	10YR6/6	2.5YR5/8		x	
s16	80-100	ALS	2.5Y7/6	10R4/8			
s16	100-120	AL	2.5Y7/6	10R4/8			

**Annexe 3 – Calendrier d’une mission de V. Freycon en Guyane
12 mars au 2 avril 2010**

Jour	Matin	Après-midi
Vendredi 12 mars	Voyage Montpellier-Paris-Cayenne	
Samedi 13 mars	Projet Carpagg : Visite du site « Pâturage Mornand, Matiti »	
Dimanche 14 mars		
Lundi 15 mars	Projet Carpagg (Avec V. Blanfort, S. Fontaine, C. Picon-Cochard) - Description des profils de sol Bergère et Mornand - Présentation de profils de sols forestiers de référence de Paracou - Prélèvement d’échantillons de sols de pâturages - Exposé « Déterminants de la teneur en C du sol » à l’Umr Ecofog	
Mardi 16 mars		
Mercredi 17 mars		
Jeudi 18 mars		
Vendredi 19 mars		
Samedi 20 mars		
Dimanche 21 mars		
Lundi 22 mars	Projet Carto des sols de Paracou Travail avec J. Weigel : synthèse de la cartographie des sols	
Mardi 23 mars		
Mercredi 24 mars		
Jeudi 25 mars		
Vendredi 26 mars		
Samedi 27 mars		
Dimanche 28 mars		
Lundi 29 mars	Projet Carpagg : Terrain Paracou	Projet Carto des sols : validation P2, P1 Réunion avec D. Bonal (Carpagg) Réunion avec G. Vincent (Article Crique Plomb)
Mardi 30 mars	Projet Guyafor, Couac : Terrain Bafog	
Mercredi 31 mars		
Jeudi 1 avril	Projet Habitats : Réunion de travail avec S. Guitet	Voyage Cayenne- Paris
Vendredi 2 avril	Voyage Cayenne- Paris- Montpellier	

Annexe 4 – Description du profil Bergère

Id : Carpagg-Bergère

Localisation : Guyane, Commune=Sinnamary ; Exploitation Bergère

Le profil se trouve à une centaine de mètres de la tour à flux.

Coordonnées de la tour à flux : WGS84, UTM 22N : x = 277875 m E ; y = 592056 m N

Coordonnées géographiques de la tour à flux : Latitude = 5°21'11,1'' N ; Longitude = 53°0'16,1'' W

Altitude : 37 m d'après image SRTM à 90 m de résolution

Végétation : Pâturage, 32 ans après déforestation (forêt coupée en 1978)

Géologie : Schiste de Bonidoro (d'après carte géologique Mazéas 1/100000)

Pluviosité : **A compléter**

Topographie : Tiers supérieur du versant d'une colline sur une pente régulière.

Ouverture de la fosse : 16 mars 2010 (E. Abner, Janssen, V. Freycon)

Description de la fosse : 16 mars 2010 (V. Freycon), Pluie faible les jours précédents

Dimension de la fosse : Longueur=1,3m x largeur =1m x Prof.=1 m

Hydrologie : Sec de manière saisonnière ; Drainage naturel favorable ; Sans excès d'eau

Rattachement au WRB (2014) : Geric Ferralsol **(A confirmer par argile dispersable à l'eau)**



Photo 1 : Vue d'ensemble du profil

Description du profil de sol **Bergère**

Horizon 1 : 0 à 10/15 cm

Humide. 10YR4/4 (dark yellowish brown). Absence de taches. Sablo-limoneux. Structure polyédrique subanguleuse 10 mm et sous-structure grumeleuse. Poreux. Racines fines très nombreuses. Eléments grossiers (5% du volume) : graviers de quartz aplatis anguleux. Charbon de bois peu nombreux. Transition ondulée sur 1 cm (Photo 1).

Horizon 2 : 10/15 à 30/35 cm

Humide. 10YR4/6 (dark yellowish brown) dans la partie supérieure à 7.5YR5/6 (strong brown) dans la partie inférieure. Absence de taches. Sablo-argileux. Structure polyédrique subanguleuse 30 mm et sous-structure microagrégée forte. Poreux. Racines très fines nombreuses. Eléments grossiers (5% du volume) : graviers de quartz. Charbon de bois peu nombreux. Transition ondulée sur 3 cm.

Horizon 3 : 30/35 à 100 cm

Frais. 7.5YR5/8 (strong brown). Absence de taches. Argilo-sablo-limoneux. Structure polyédrique subanguleuse 30 mm et sous-structure microagrégée. Poreux. Racines très fines nombreuses. Absence d'éléments grossiers. Horizon homogène (Photo 2, Photo 3).

Profondeur de prélèvement des échantillons de sol par horizon :

Horizon 1 : 0-5 cm

Horizon 1 : 5-15 cm

Horizon 2 : 25 cm

Horizon 3 : 60 cm



Photo 1 : Transition ondulée variant entre 10 et 15 cm entre l'horizon 1 et l'horizon 2



Photo 2 : Horizon 3 homogène entre 30/35 et 70 cm



Photo 3 : Horizon 3 homogène entre 60 et 100 cm

Proposition :
 Horizon 1 : A
 Horizon 2 : B₁
 Horizon 3 : B₂

Profil		Bergère	Bergère	Bergère	Bergère
N° échantillon_labo		15S056-1	15S056-2	15S056-3	15S056-4
Horizon		1	1	2	3
Prof.	cm	0-5	5-15	20-30	55-65
Eléments grossiers	g/kg	NA	NA	NA	NA
Granulométrie					
A	g/kg	246	287	388	274
LF	g/kg	65	29	43	97
LG	g/kg	7	11	20	59
SF	g/kg	146	115	114	108
SG	g/kg	535	559	435	463
pH					
pH eau		5,7	5,4	5,3	5,1
pH KCl		5,0	4,5	4,8	5,2
Δ pH		-0,8	-0,9	-0,5	0,1
Matière organique					
Perte au feu 480°	%	NA	NA	NA	NA
C	g/kg	23,7	14,3	8,1	5,1
N	g/kg	1,8	1,1	0,6	0,3
C:N		13	13	15	15
Phosphore Bray2	mg/kg	295,1	18,5	1,7	1,1
Bases échangeables					
Ca éch	cmolc kg-1	3,7	1,3	0,6	0,3
Mg éch	cmolc kg-1	0,5	0,1	0,0	0,0
K éch	cmolc kg-1	0,1	0,1	0,0	0,0
Na éch	cmolc kg-1	0,1	0,0	0,0	0,0
S	cmolc kg-1	4,4	1,5	0,6	0,3
CEC	cmolc kg-1	5,9	3,5	2,8	2,0
CECargile	cmolc kg-1 argile	23,9	12,0	7,2	7,2
TS	%	75	44	21	16
Acidité d'échange, KCl					
Al éch	cmolc kg-1	0,0	0,2	0,0	0,0
H éch	cmolc kg-1	0,1	0,1	0,1	0,1
ECEC	cmolc kg-1	4,5	1,7	0,6	0,3
ECECargile	cmolc kg-1 argile	18,1	5,8	1,6	1,2
Formes du Fe, Al et Si					
Fed	g/kg	30,6	36,8	44,8	48,6
Ald	g/kg	8,6	10,7	12,7	13,5
Sid	g/kg	0,3	0,3	0,3	0,3
Feo	g/kg	2,0	2,1	0,8	0,3

Alo	g/kg	2,0	1,9	2,5	2,3
Sio	g/kg	0,1	0,1	0,1	0,1
Fep	g/kg	2,9	4,5	3,2	0,3
Alp	g/kg	1,7	2,3	1,9	0,8
Sip	g/kg	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Feo:Fed		0,07	0,06	0,02	0,01
Fep:Feo		1,41	2,18	3,98	0,79
Alp:Alo		0,86	1,21	0,77	0,35
Alo+1/2Feo	g/kg	2,96	2,94	2,88	2,48
Recherche hz argic					
S	%	68	67	55	57
A	%	25	29	39	27
A(hz) - A(hz sup)	%		4,1	10,1	-11,4
A(hz):A(hz sup)			1,17	1,35	0,71
Recherche hz ferralic					
A dispersable à l'eau		NA	NA	NA	NA
Recherche propriété Géric					
ΔpH		-0,8	-0,9	-0,5	0,1
ECECclay	cmolc kg-1 clay	18,1	5,8	1,6	1,2
RR		0	0	0	4
Eléments totaux					
Si	mg/kg	574574	604461	512512	519376
Ca	mg/kg	1746	457	272	175
Mg	mg/kg	229	160	144	123
K	mg/kg	370	330	360	390
Na	mg/kg	108	101	92	102
Fe	mg/kg	43760	49540	64240	72640
Al	mg/kg	82490	93210	122640	139140
Ti	mg/kg	11190	11810	13730	14130
Mn	mg/kg	168	137	139	119

Rattachement au WRB (2014) :

- Granulométrie : sandy clay loam (68% sables, 25% argile) dans l'horizon de surface → sandy clay (55% sables, 39% argile) dans l'horizon 2 → sandy clay loam (57% sables, 27% argile) dans l'horizon de profondeur. Mais l'augmentation d'argile dans l'horizon 2 n'est pas suffisante par rapport à l'horizon 1 (Rapport = 1,35 < 1,4) pour pouvoir classer l'horizon 2 comme un horizon argic.
- Correspondance correcte entre la texture perçue sur le terrain et la granulométrie
- Les horizons 2 et 3 ont une structure microagrégée qui pourrait conclure à un horizon ferralic. A valider par la mesure de l'argile dispersable à l'eau.
- L'horizon 3 a des propriétés gériques (ECECclay < 1,5 cmolc.kg⁻¹ clay)

Proposition : Geric Ferralsol. A valider par la mesure de l'argile dispersable à l'eau de l'horizon 3

Annexe 5 – Description du profil Mornand

Id : Carpagg-Mornand

Localisation : Guyane, Commune=Matiti ; Exploitation Mornand

Coordonnées : WGS84, UTM 22N : x = 324997 m E ; y = 552220 m N

Coordonnées géographiques : Latitude = 4°59'38,7'' N ; Longitude = 52°34'42,5'' W

Altitude : 44 m d'après image SRTM à 90 m de résolution

Végétation : Pâturage, 3 ans après déforestation

Géologie : Granite Galibi (d'après carte géologique Choubert 1/500 000)

Pluviosité : **A compléter**

Topographie : Tiers supérieur du versant d'une colline. Pente régulière.

Ouverture de la fosse : **Date à préciser** ; avec la pelle d'un tractopelle

Description de la fosse : 18 mars 2010 (V. Freycon), Pluie moyenne les jours précédents

Dimension de la fosse : Longueur=4m x largeur =1m x Prof.=2,50 m

Hydrologie :

Régime hydrique saturé de manière saisonnière

Drainage naturel modéré

Nappe perchée temporaire

Rattachement au WRB (2014) : Gleyic Acrisol



Photo 1 : Vue d'ensemble du profil

Description du profil de sol **Mornand**

Horizon 1 : 0 à 10 cm

Très humide (Photo 2). 10YR3/2 (very dark grayish brown). Absence de taches. Sableux. Structure grumeleuse 2 mm forte. Très poreux. Racines très fines nombreuses. Absence d'éléments grossiers. Transition régulière sur 1 cm.

Horizon 2 : 10 à 35/80 cm

Cet horizon présente dans sa partie inférieure des langues (ou glosses) dont la forme fait penser au système racinaire d'un arbre (Photo 3). C'est dans ces glosses qu'ont été trouvés des charbons de bois.

Humide. 10YR5/5 (yellowish brown). Taches rouges assez nombreuses (5 à 15%), moyennes, nettes, très contrastées, autour des racines. Argilo-sableux. Structure polyédrique subanguleuse 20 mm forte et sous-structure grumeleuse 2 mm modérée. Peu poreux. Racines fines nombreuses. Eléments grossiers (5% du volume), graviers de quartz aplatis anguleux. Nombreuses racines décomposées. Charbons de bois à 65 et 70 cm (Photo 4). Transition irrégulière sur 2 cm.

Horizon 3 : 35/80 à 110/160 cm

Cet horizon présente une glosse dans sa partie inférieure, à droite.

Frais. 10YR6/6 (brownish yellow) dans la partie supérieure à 7.5YR6/8 (reddish yellow) dans la partie inférieure. Absence de taches. Argileux. Structure polyédrique subanguleuse 30 mm forte et sous-structure microagrégée 1 mm faible. Poreux. Racines très fines peu nombreuses. Eléments grossiers (25% du volume) : 5% de graviers de quartz aplatis anguleux et 20% de cailloux de quartz irréguliers anguleux. Transition irrégulière sur 3 cm

Horizon 4 : 110/150 à 150 cm

Cet horizon est absent sur la partie droite du profil.

Frais. 5YR5/8 (yellowish red). Taches peu nombreuses (2 à 5%), moyennes, nettes, contrastées, en remplissage de fissures. Deux types de taches (Photo 5) : (i) linéaire, orientée verticalement et jaune-brun, de même couleur que l'horizon 3 ; (ii) ou arrondies et brun-jaune, de même couleur que l'horizon 2 (Photo 4). Argilo-limono-sableux. Structure polyédrique subanguleuse 40 mm forte. Peu poreux. Racines très fines peu nombreuses. Eléments grossiers (10% du volume), cailloux de quartz irréguliers anguleux. Transition régulière sur 2 cm

Horizon 5 : 150 à 220 cm

Frais. 2.5YR5/8 (red). Taches brun-jaune, de même couleur que l'horizon 2, peu nombreuses (2 à 5%), moyennes, nettes, contrastées, en remplissage de fissures, de forme arrondie (Photo 6). Limono-sableux. Structure massive. Peu poreux. Racines très fines très peu nombreuses. Eléments grossiers (30% du volume). Trois types d'éléments grossiers : (i) cailloux de quartz irréguliers anguleux (Photo 7); (ii) paillettes de mica 20 mm, aplatis anguleux (Photo 7); (iii) et roche pourrie (sapolite) de granite trouvée à 200 cm de profondeur sur la face principale (Photo 8) et à 160 cm de profondeur sur la face latérale gauche.

Profondeur de prélèvement des échantillons de sol par horizon :

Horizon 1 : 0-10 cm

Horizon 2 : 30 cm

Horizon 3 : 60 cm

Horizon 3 : 90 cm

Horizon 4 : 130 cm

Horizon 5 : 180 cm

Profondeur de prélèvement pour densité apparente (méthode au cylindre) :
 0-5 cm ; 5-10 cm ; 30-35 cm ; 60-65 cm ; 90-95 cm ; 130-135 cm.

Schéma du profil de sol **Mornand**, carnet de terrain, 18 mars 2010

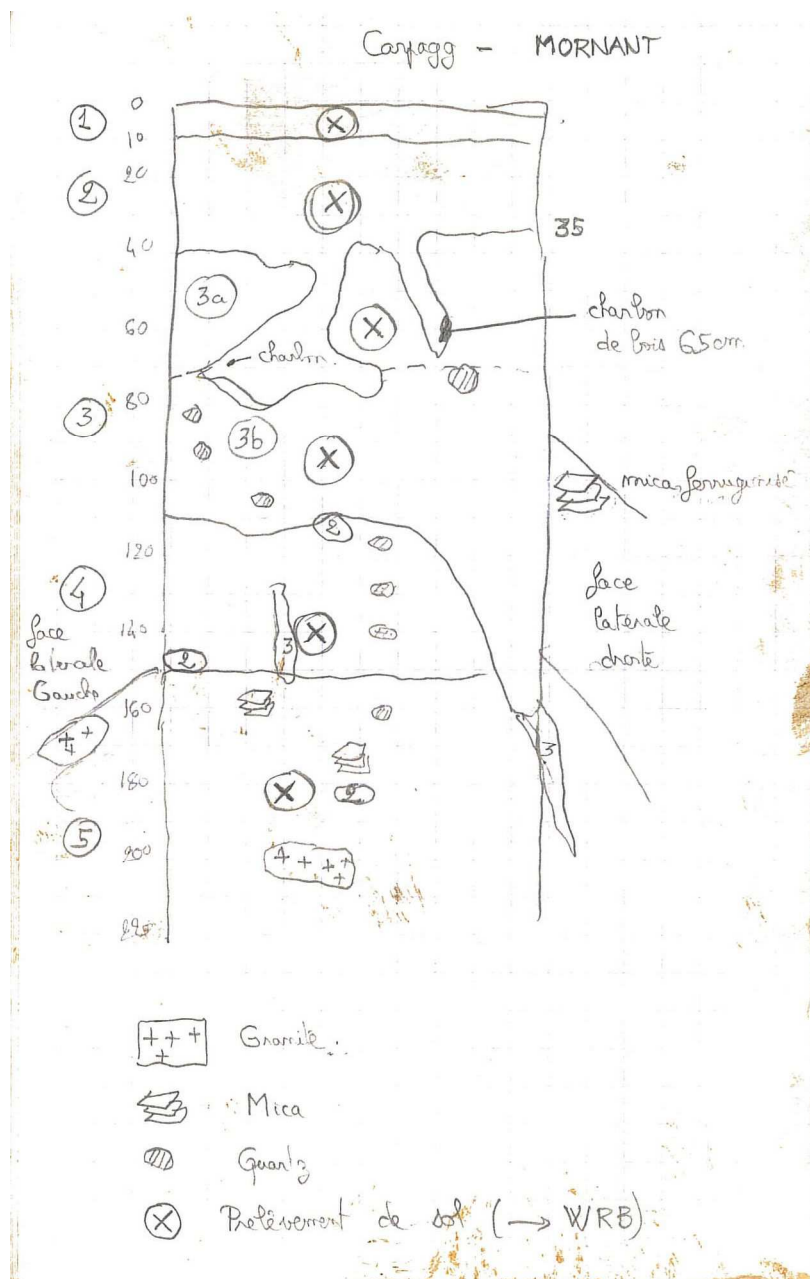




Photo 2 : Horizon 1 de surface très humide



Photo 3 : Glosses dans l'horizon 2 rappelant la forme d'un système racinaire d'un arbre



Photo 4 : Charbon de bois à 65 cm (Horizon 2)

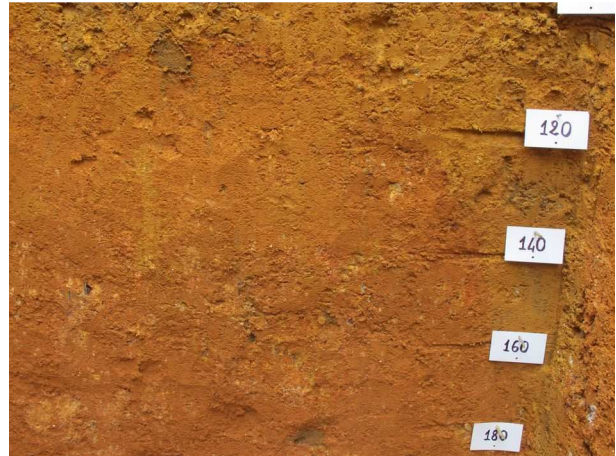


Photo 5 : Deux types de taches dans l'horizon 4, en remplissage de fissures (i) jaune-brun verticale à 125-145 cm ; (ii) brun-jaune arrondie à 110 cm

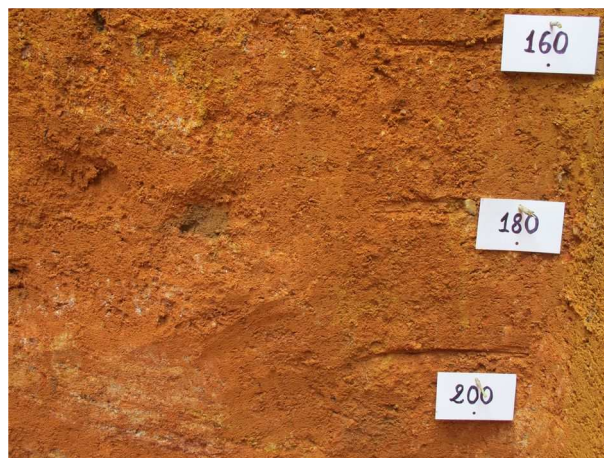


Photo 6 : Tache brun-jaune arrondie à 180 cm (Horizon 5)



Photo 7 : Quartz (centre et bas de la photo) et paillettes de mica (haut de la photo) (Horizon 5)



Photo 8 : Saprolite de granite vers 2 m de profondeur (Horizon 5)

Proposition :

Horizon 1 : A

Horizon 2 : B₁

Horizon 3 : B₂

Horizon 4 : B₃

Horizon 5 : C

Profil		Mornand	Mornand	Mornand	Mornand	Mornand	Mornand
N° échantillon_labo		15S056-5	15S056-6	15S056-7	15S056-8	15S056-9	15S056-10
Horizon		1	2	3	3	4	5
Prof.	cm	0-10	25-35	55-65	85-95	125-135	175-185
Eléments grossiers	g/kg	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Granulométrie							
A	g/kg	165	235	285	316	376	202
LF	g/kg	42	57	57	46	69	92
LG	g/kg	20	22	24	20	23	39
SF	g/kg	123	146	173	121	80	92
SG	g/kg	649	540	461	497	452	575
pH							
pH eau		6,4	4,8	4,8	4,7	5,0	5,0
pH KCl		5,0	4,2	4,3	4,3	4,5	4,5
Δ pH		-1,4	-0,6	-0,5	-0,4	-0,5	-0,5
Matière organique							
Perte au feu 480°	%	NA	NA	NA	NA	NA	NA
C	g/kg	14,1	9,1	5,6	4,7	3,6	2,2
N	g/kg	1,2	0,7	0,4	0,4	0,3	0,2
C:N		12	13	13	13	12	13
Phosphore Bray2	mg/kg	11,2	1,3	0,8	1,1	0,6	1,0
Bases échangeables							
Ca éch	cmolc kg-1	0,7	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2
Mg éch	cmolc kg-1	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
K éch	cmolc kg-1	0,9	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
Na éch	cmolc kg-1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
S	cmolc kg-1	2,7	0,6	0,4	0,3	0,2	0,3
CEC	cmolc kg-1	3,5	3,0	2,6	2,3	2,1	1,2
CECargile	cmolc kg-1 argile	21,4	12,6	9,0	7,2	5,6	5,7
TS	%	75	19	15	12	11	23
Acidité d'échange, KCl							
Al éch	cmolc kg-1	0,0	0,8	0,7	0,7	0,3	0,1
H éch	cmolc kg-1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1
ECEC	cmolc kg-1	2,7	1,4	1,0	1,0	0,5	0,4
ECECargile	cmolc kg-1 argile	16,1	5,9	3,6	3,1	1,3	1,8
Formes du Fe, Al et Si							
Fed	g/kg	9,4	17,4	20,2	25,8	33,6	23,4
Ald	g/kg	3,7	6,0	7,1	8,4	9,0	5,6
Sid	g/kg	0,2	0,3	0,4	0,3	0,1	0,0
Feo	g/kg	0,9	1,6	1,2	0,8	0,3	0,2

Alo	g/kg	1,3	2,0	2,2	2,5	2,4	1,4
Sio	g/kg	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1
Fep	g/kg	1,8	4,5	5,6	4,4	0,7	0,3
Alp	g/kg	1,3	2,9	3,8	2,8	1,2	0,8
Sip	g/kg	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Feo:Fed		0,10	0,09	0,06	0,03	0,01	0,01
Fep:Feo		1,90	2,79	4,53	5,77	2,69	1,92
Alp:Alo		0,98	1,46	1,68	1,11	0,48	0,54
Alo+1/2Feo	g/kg	1,78	2,81	2,86	2,92	2,55	1,51
Recherche hz argic							
S	%	77	69	63	62	53	67
A	%	17	23	29	32	38	20
A(hz) - A(hz sup)	%		7,0	5,1	3,1	6,0	-17,4
A(hz):A(hz sup)			1,42	1,22	1,11	1,19	0,54
Recherche hz ferralic							
A dispersable à l'eau		NA	NA	NA	NA	NA	NA
Recherche propriété Géric							
ΔpH		-1,4	-0,6	-0,5	-0,4	-0,5	-0,5
ECECclay	cmolc kg-1 clay	16,1	5,9	3,6	3,1	1,3	1,8
RR		0	0	0	0	8	12
Eléments totaux							
Si	mg/kg	661876	657300	733161	652724	510224	280352
Ca	mg/kg	203	121	100	80	86	66
Mg	mg/kg	313	340	330	380	463	830
K	mg/kg	1850	2500	2380	3020	6420	13050
Na	mg/kg	154	118	121	135	236	466
Fe	mg/kg	9690	17510	20090	26700	35100	25150
Al	mg/kg	52240	90460	100910	120440	171040	163610
Ti	mg/kg	1440	2790	3130	3240	3650	2310
Mn	mg/kg	29	31	29	33	55	86

Rattachement au WRB (2014) :

- Granulométrie : sandy loam (77% sables, 17% argile) dans l'horizon de surface → sandy clay loam à mi-profondeur → sandy clay (53% sables, 38% argile) dans l'horizon 4 [110-150 cm] → sandy clay loam (67% sables, 20% argile)
- Correspondance moyenne entre la texture perçue sur le terrain et la granulométrie
- L'horizon 2 a les caractéristiques d'un horizon argic (Argile > argile de l'horizon 1, avec un rapport > 1,4). Cet horizon argic, associé à sa valeur de CECclay (< 24 cmolc kg-1 clay) → Acrisols
- L'horizon 2 a des propriétés gleyic : > 5% de taches prédominantes autour des racines et avec certainement un Hue > 2.5 unités plus rouge que la matrice.
- L'horizon 6 contient du granite en cours d'altération, observé à 160 cm et 200 cm de profondeur. La teneur en limon est maximale dans cet horizon 6 (13% vs 6% dans l'horizon de surface) → sol « rajeuni ».

Profil de sol gardant encore les traces de la déforestation :

- Nombreuses racines décomposées dans l'horizon 2.
- Interpénétration des horizons 2 et 3. Hypothèse : conséquence de la décomposition du système racinaire d'un arbre ou à l'arrachage de sa souche et des grosses racines → les racines extraites ont laissé un volume qui a été comblé par du sol provenant des horizons supérieurs.
- Volumes des horizons 2 et 3 retrouvés dans les horizons 4 et 5. Hypothèse : ces volumes ont suivi le tracé d'anciennes racines.
- Horizon 2 peu poreux et avec des taches d'oxydation autour des racines. Hypothèse : conséquence d'une compaction du sol lors de la déforestation.

Proposition : Gleyic Acrisol

Annexe 6 – Relevés GPS (WGS84, UTM 22N) et altitude (source SRTM, 30 m et 90 m de résolution) des sondages tarière prélevés en mai 2015 et des deux profils de sols étudiés en mars 2010

Site	Sondage Profil	X (m)	Y (m)	Altitude (m)		Echantillon
				Source : SRTM		de sol
				30 m	90 m	
M. Villarsin	s1	311060	568890	19	11	15S055-1 15S055-2
M. Villarsin	s2	311125	568990	13	15	
M. Villarsin		311075	568900	14	14	
M. Villarsin		311085	568890	14	11	
Buffard	s3	323815	561635	4	4	15S055-3
Buffard		323765	561660	-	-	
Buffard	s4	323670	561545	9	8	
Lycée agricole Matiti	s5	326230	557085	11	10	15S055-4
	s6	276305	594320	10	10	15S055-5
M. Dalquier	s7	276455	594520	7	7	15S055-6
M. Dalquier	s8	276490	594510	8	8	
H. Bergère	s9	278660	592590	7	9	15S055-7
H. Bergère	s10	278790	592630	8	11	15S055-8
J.-F. Joffre	s11	323035	557985	6	9	15S055-9
Rodrigue	s12	322085	557630	33	33	15S055-10
Delor	s13	172560	607390	55	53	15S055-11
Delor	s14	172410	607440	23	33	15S055-12
Van der Berg	s15	197145	623915	4	6	15S055-13
Van der Berg	s16	196645	624515	6	6	15S055-14
Bergère	Tour à flux* Profil	277875	592056	35	37	15S056-1 à 4
Mornand		324997	552220	-	44	15S056-5 à 10

* Les relevés GPS sont ceux de la Tour à flux. Le profil de sol « Bergère » était à une centaine de mètres de la Tour à flux.

**Les déterminants environnementaux et
édaphiques de la teneur en carbone du sol.
Bibliographie et résultats (Guyafor, Paracou)**

V. Freycon, B. Ferry, M. Desprez, L. Soucémariadin, J. Weigel,
J.B. Roelens, A. Jolivot, L. Blanc

V. Freycon, 19 mars 2010, Umr Ecofog

1

Bibliographie

S'inspire fortement du chap. 4 de Ferry (1992)

« Les humus forestiers des Ghâts occidentaux en Inde du sud. Facteurs climatiques, édaphiques et biologiques intervenant dans le stockage de la matière organique du sol »

Bibliographie réactualisée :

Torn et al. 1997, Schuur et al. 2001, Percival et al. 2001, Zinn et al. 2005, 2007

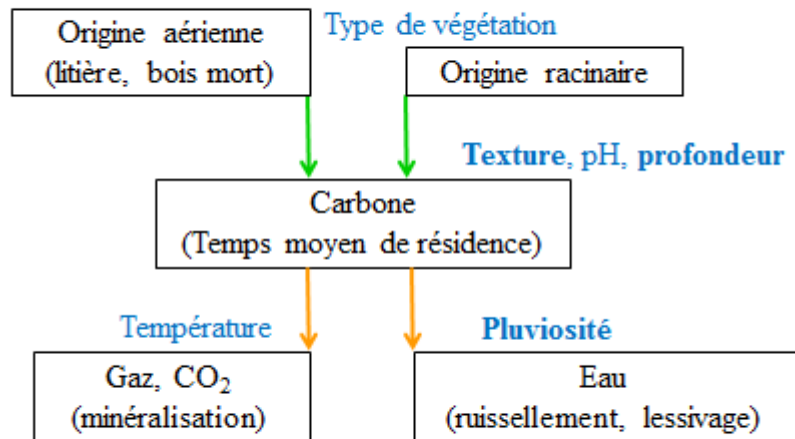
Bibliographie non exhaustive (démarrage de ce thème dans le projet Carpagg)

Bibliographie sur teneur en C (%) et non sur stock de C (t/ha).
Stock = teneur en C, densité apparente, profondeur

Bibliographie sur teneur en C organique \approx C total
C minéral en zone tropicale ≈ 0

2

Flux de C dans le sol ... et les déterminants de la teneur en C



Dean 1930, Jenny et al. 1948 3

1. Pluviosité et Carbone

Pluviosité positivement corrélée à la teneur en C en zone tropicale (Spain et al. 1983, Schuur et al. 2001)

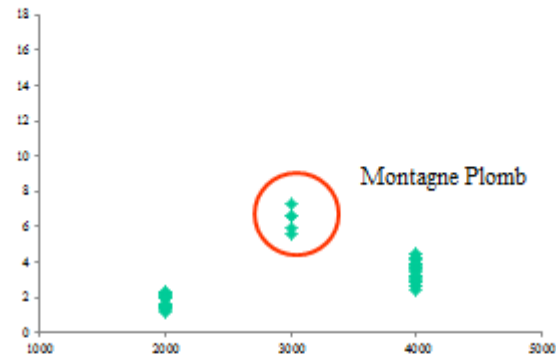
Mécanisme (Schuur et al. 2001, Fig. 10) :

Pluviosité $\uparrow \rightarrow$ Oxygène sol $\downarrow \rightarrow$ Décomposition $\downarrow \rightarrow$ Teneur en C \uparrow

Facteur plus pertinent = durée pendant laquelle les sols sont humides.

4

Pluviosité et Carbone (Guyafor, [0-20 cm])



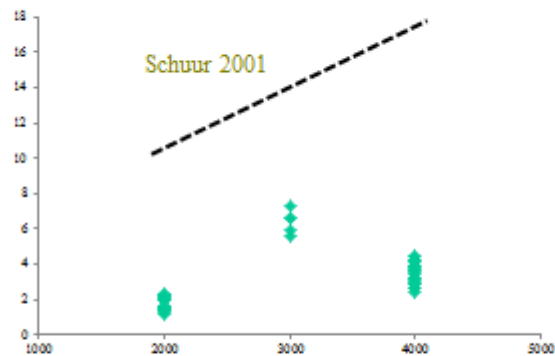
Corrélation positive entre Pluviosité et C non confirmée.

Particularité de Montagne Plomb avec forte teneur en C.

Hyp. : quantité d'éléments grossiers importante → cc des apports organiques dans un volume restreint → ↑ teneur en C (Lévêque 1988). Mais ...

5

Pluviosité et Carbone (Guyafor, [0-20 cm])



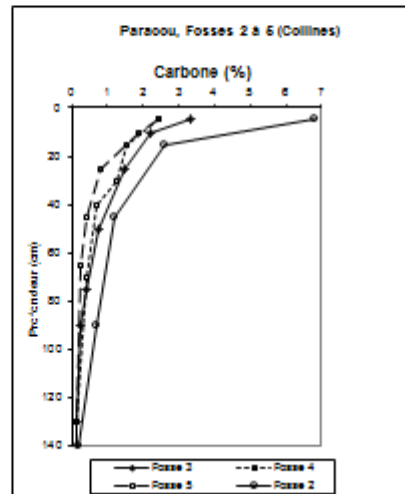
Teneurs en C-Guyafor faibles par rapport aux andosols associés à des laves volcaniques d'Hawaï (Schuur et al. 2001)
→ Influence du substrat géologique sur teneur en carbone via minéraux du sol (allophanes)

6

2. Profondeur et Carbone

Diminution du carbone avec la profondeur bien connue et modélisée sous la forme $C = a \cdot \text{prof}^b$ (Bennema 1974)

Décroissance plus rapide de C sous forêt que sous savane (Boissezon et al. 1973, Humbel et al. 1977)



7

3. Texture et Carbone

Dans une région avec un même climat et un même couvert végétal,

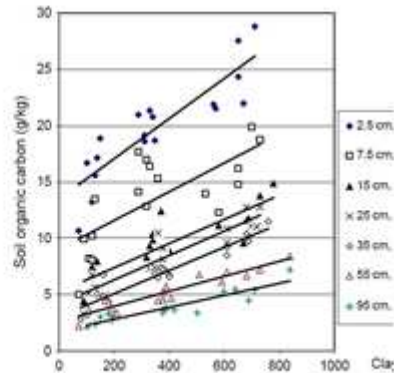
- La teneur en argile (ou argile + limons fins) est positivement corrélée à la teneur en C (Turenne 1977, Spain et al. 1990, Feller et al. 1991, Ohta & Effendi 1992)

Mécanisme : une plus grande quantité d'argile permet de retenir une plus grande quantité de matière organique pour former des complexes argilo-humiques considérés comme plus résistants à la minéralisation que la m.o. non combinée.

8

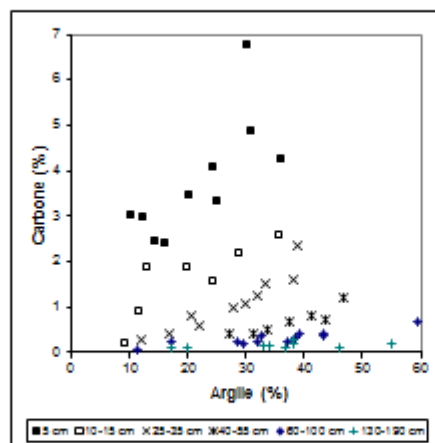
Dans une région avec un même climat et un même couvert végétal,

- C'est (seulement) la décomposition de « freshly added plant material » qui est influencée par la teneur en argile (Oades 1988, Scott et al. 1996)
- La relation entre (argile + limons fins) et C diminue avec la profondeur (Zinn et al. 2005)



9

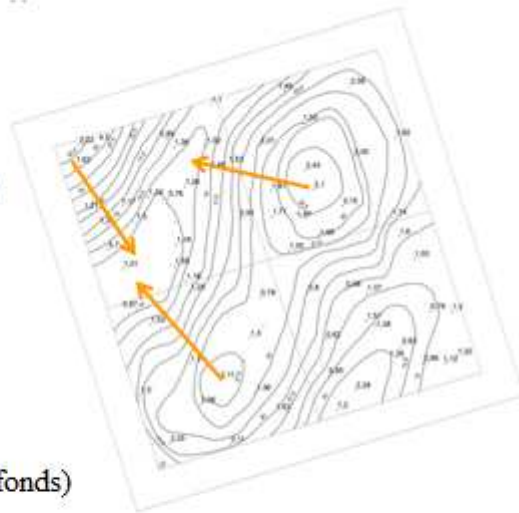
Texture et Carbone (Paracou, fosses)



Résultats similaires à ceux de Zinn et al. 2005

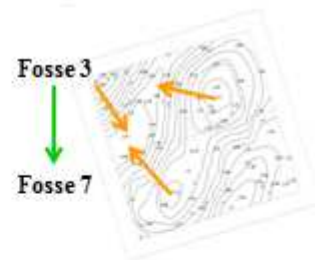
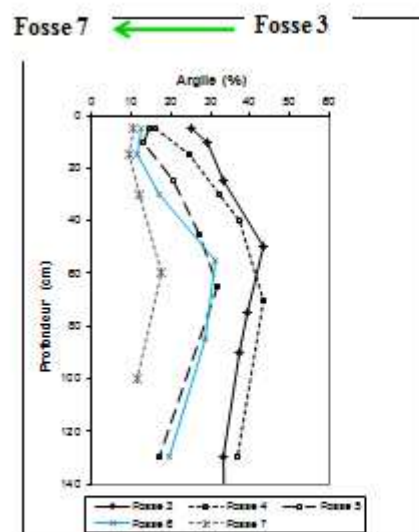
10

Distribution spatiale
de la teneur en C
suivant la topographie
(Paracou P15 [10- 20 cm])



Teneur en C :
2% (sommet) → 1% (bas-fonds)

11



Bilan : C-Argile et Argile-Topo → C-Topo

12

Dans une région avec un même climat et un même couvert végétal,

- La teneur en argile (ou argile + limons fins) est positivement corrélée à la teneur en C (Turenne 1977, Spain et al. 1990, Feller et al. 1991, Ohta & Effendi 1992)

Dans une région avec des climats différents et un même couvert végétal,

- La teneur en argile n'est pas obligatoirement le facteur-clé qui contrôle la teneur en C. Parfois : non relié à C. D'autres facteurs plus importants : pluviosité, type de drainage (Davidson & Lefebvre 1993), oxydes de fer et d'aluminium (Torn et al. 1997, Percival et al. 2000)

13

4. Oxydes (fer, aluminium) et Carbone

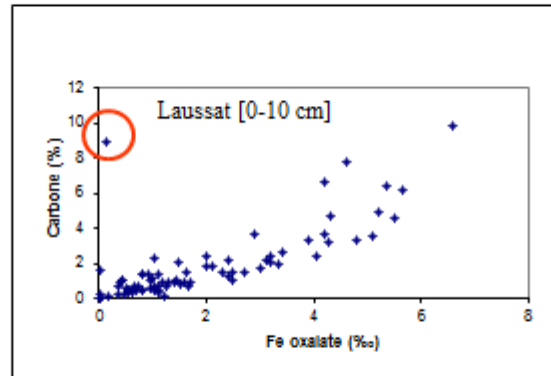
Corrélation entre oxydes de fer et/ou aluminium non cristallins (extraits oxalate) et teneur en C

Observée souvent à une échelle régionale, avec des sols d'âges différents :

- Sols jeunes abondants en oxydes non cristallins, qui ont une forte affinité avec la m.o.
- Sols anciens abondants en oxydes cristallins (hématite, goéthite, ...) qui ont une faible affinité avec la m.o. (Torn et al. 1997, Percival et al. 2000)

14

Oxydes de fer et Carbone (Guyafor, fosses)



Relation entre C et oxydes de fer non cristallisé confirmée
Particularité Laussat [0-10 cm] avec forte teneur en C

15

Particularité Laussat

Caractéristiques d'un sol :

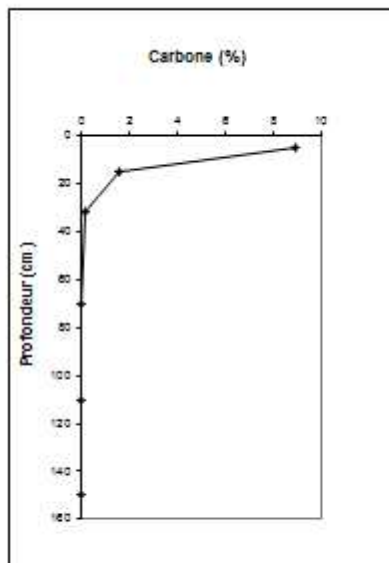
- Sableux
- Très faible teneur en oxydes de fer non cristallisés
- Pluviosité faible
- En théorie : faible teneur en C

En pratique : forte teneur en C



Cause : C/N élevé (=20) → blocage de la minéralisation de la m.o. dans l'horizon de surface

16



Exportation de la m.o. en-dehors du système → « Coca-Cola river »

17

5. Conclusion

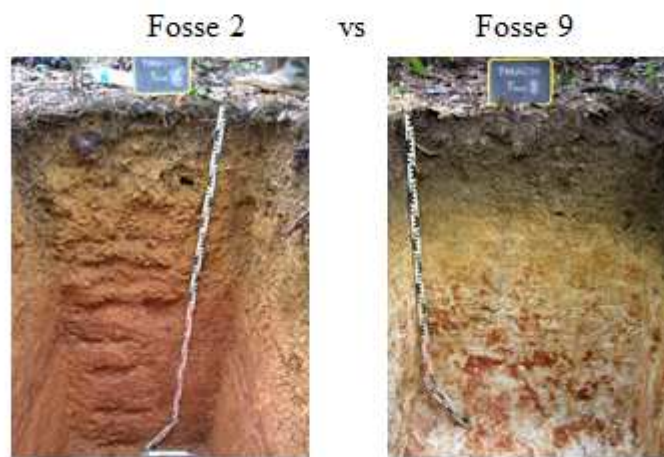
Différents facteurs ont un effet sur la teneur en carbone

- environnementaux : pluviosité
- édaphiques : texture, oxydes de fer, ...
- couvert végétal (Carpagg)
- biologiques (macrofaune, ...)

Interdépendance entre les différents critères édaphiques

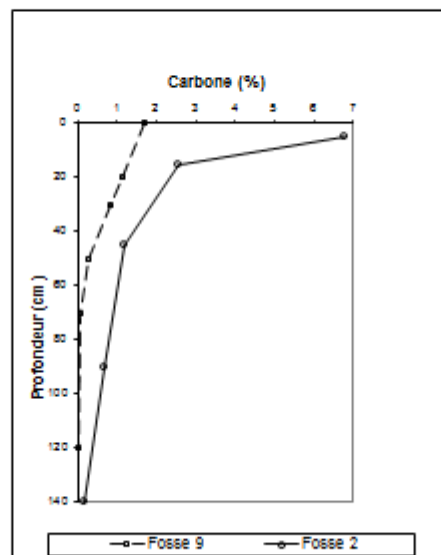
18

Devinette : quelle est la fosse qui a la plus forte teneur en carbone ?



19

Réponse : La fosse 2



20

Bilan : Le rouge l'emporte sur le noir
(oxyde de fer, hématite) (humus)



21

Merci pour votre attention

22